This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

TA344
C66
1959
v.4

CONGRÈS INTERNATIONAL

DE

MÉCANIQUE APPLIQUÉE

Paris. — Imprimerie E. Bernard et Cie, 71, rue La Condamine.

CONGRÈS INTERNATIONAL

DE

MÉCANIQUE APPLIQUÉE

Tenu à Paris du 16 au 21 septembre 1889

SOUS LA PRÉSIDENCE DE **M. PHILLIPS**, MEMBRE DE L'INSTITUT

TOME QUATRIÈME

PARIS

E. BERNARD ET Cie, IMPRIMEURS-ÉDITEURS

LIBRAIRIE — 53 ter, Quai des Grands-Augustins

IMPRIMERIE — 71, Rue La Condamine, 71

1891

LES MACHINES FRIGORIFIQUES
et leurs applications
à l'Exposition universelle de 1889

PAR

Gustave RICHARD

INGÉNIEUR CIVIL DES MINES

Nous nous proposons de décrire dans ce mémoire, qui n'est pas un traité, mais seulement une rédaction plus étendue du rapport que nous avons présenté au *Congrès international de mécanique appliquée*, en septembre 1889 (1), les principaux appareils actuellement employés dans l'industrie pour la production artificielle du froid et leurs applications les plus importantes : nous ne ferons qu'insister plus longuement sur les appareils exposés, en trop petit nombre pour que leur description seule eût suffit à donner une idée assez exacte de l'état actuel de l'industrie du froid.

Les divers moyens appliqués ou proposés pour la production du froid artificiel sont très nombreux, mais un seul a survécu et semble devoir se maintenir dans la grande industrie du moins : c'est celui qui consiste à utiliser le froid produit par la détente d'un gaz comprimé ou d'une vapeur liquéfiée, refroidis pendant leur compression.

Parmi les autres moyens, que nous nous bornerons à indiquer en passant, il faut retenir le suivant, fondé sur le principe de Leslie, et qui consiste essentiellement à vaporiser dans le vide un liquide plus ou moins volatil, dont les vapeurs sont ensuite rejetées dans l'atmosphère (*Atkinson*) ou absorbées par un réactif que l'on régénère indéfiniment. Le type le plus connu de ces machines est l'appareil domestique de *Carré* (2) qui emploie comme liquide volatil l'eau même à congeler et comme absorbant l'acide sulfurique, déjà préconisé par *Nairne* (1880), *Vallance* (3) et *Tellier* (4). Tout récemment M. *Fleuss* (5) a apporté à cet appareil quelques modifications de détail, qui en rendent le maniement plus

1. Production mécanique et utilisation du froid artificiel (*Bulletin de la Société d'Encouragement*, (novembre et décembre 1889), *Comptes-Rendus du Congrès* et *Annales du Conservatoire des Arts-et-Métiers*, 2e série, vol. 1.
2. Brevets anglais 4164 de 1876.
3. Brevets anglais 4884 et 5001 de 1824.
4. Brevet anglais 228 de 1872.
5. Brevets anglais 2408 de 1876 et 223 de 1887.

facile, mais sans lui enlever l'inconvénient du danger que présente fatalement l'emploi de l'acide sulfurique dans les usages domestiques. D'autres inventeurs, notamment *Windhausen* (1), *Galland* (2), *Conacher*, *Williams* et *Lange* (3) ont appliqué en grand les appareils à acide sulfurique; mais les difficultés inhérentes à la délicatesse des pompes à faire le vide, à la manutention et à la régénération de l'acide ont empêché ces appareils de se maintenir dans la pratique, malgré leurs dispositions ingénieuses et la supériorité temporaire de leur rendement.

On évite ces manipulations dangereuses et compliquées, mais aux dépens du rendement et de l'activité de la machine, en remplaçant l'absorption des vapeurs par une condensation, comme dans l'appareil d'*Atkinson* (4) et dans l'intéressante petite machine industrielle de *Blythe* et *Southby*, qui présente en compensation l'avantage très précieux d'une innocuité parfaite (5).

La production du froid par les *dissolutions salines* et les combinaisons endothermiques est également restée limitée aux appareils domestiques, malgré l'ingénicsité développée par un grand nombre d'inventeurs, notamment *Siemens* (6), *Mort* (7), *Rossi* (8), *Galland* et *Wilson* (9). Enfin, tout récemment M. *Dewey* a proposé de produire le froid en utilisant les effets électro-thermiques de Peltier et de Thomson (10).

Nous allons maintenant étudier avec quelques détails le genre de machines frigorifiques presque exclusivement adoptées aujourd'hui dans l'industrie, fondées, comme nous l'avons dit, sur l'emploi de la détente des gaz comprimés ou de vapeurs liquéfiées.

Ces machines se divisent en deux classes :

Machines à gaz comprimés;

Machines à gaz liquéfiés.

Les machines à gaz liquifiés se divisent elles-mêmes en deux variétés: machines *à compression* et machines *à affinité*, suivant qu'on emploie, pour liquéfier les gaz, la compression mécanique, ou, après leur dissolution dans un liquide absorbant, l'action de la chaleur sur ce liquide.

Machines à air

Considérations générales. — Le principe très simple du fonctionnement des machines frigorifiques a air est le suivant : si, après avoir comprimé une masse

1. Brevets anglais 1678 de 1878, 2010 de 1880. — *Engineering*, 27 octobre 1882, p. 404. — *La Nature*, 3 mai 1884.
2. Brevet anglais 1346 de 1873. — PÉCLET, *La Chaleur*, t. III, p. 150.
3. Brevets anglais 14082 de 1886; 1181, 2319 de 1887; 860 de 1888.
4. Brevet anglais 16547 de 1886.
5. *The Engineer*, 28 décembre 1888, p. 530.
6. Brevets anglais 1105 de 1855, 2074 de 1858.
7. Brevet anglais 1208 de 1876.
8. id. 8777 de 1881.
9. id. 1398 de 1879.
10. Electrical World. 26 octobre 1889, p. 274.

d'air, on la laisse se refroidir à la température ambiante, puis se détendre en accomplissant un travail, cet air se refroidira au-dessous de la température ambiante d'une quantité proportionnelle au travail de détente [1].

Dans les machines à cycle fermé, c'est toujours la même masse d'air qui agit, tantôt comprimée, tantôt détendue, circulant indéfiniment dans la machine; avec les machines à cycle ouvert, l'air se renouvelle à chaque aspiration du compresseur, pour être expulsé dans l'atmosphère après sa détente. On peut évidemment, dans ce dernier cas, utiliser la basse température de l'air qui retourne ainsi dans l'atmosphère pour refroidir l'air aspiré au compresseur : c'est une application aux machines frigorifiques des récupérateurs de chaleur des moteurs à air chaud.

Il est d'ailleurs facile de voir, d'après ce qui précède, que l'on peut considérer en général les machines frigorifiques à air comme l'inverse des moteurs thermiques ou à air chaud : elles transforment du travail en chaleur de compression, tandis que les moteurs thermiques transforment de la chaleur en travail de détente.

On en déduit immédiatement cette conséquence, vérifiée par la pratique : que, toutes choses égales, le rendement des machines frigorifiques diminue avec la chute de température, ou avec l'écart des températures extrêmes de leur cycle; mais on peut faire ressortir plus clairement la raison d'être de ce fait important et caractéristique en remarquant que le rendement d'une machine frigorique est d'autant plus élevé que la chaleur cédée par le corps à refroidir au gaz détendu diffère moins de celle qu'il faut enlever à l'air pendant sa compression. Le rendement en calories déplacées, serait infini si ces chaleurs étaient égales car on récupèrerait alors, à l'admission d'équivalent du travail de compression. Or, la température initiale t_1 de l'air est donnée, ainsi que sa température t_3 au commencement de la détente qui dépend de celle de l'eau employée pour refroidir l'air comprimé : la température t_2, de l'air à la fin de sa compression et sa température t_4 à la fin de sa détente sont au contraire variables à volonté. La chaleur absorbée par le refroidisseur étant proportionnelle à $(t_2 - t_3)$ et la chaleur prise au corps refroidi $a' - (t_1 - t_4)$, on voit que le nombre des calories déplacées par unité de travail dépensé au compressenr augmente à mesure que diminuera la quantité :

$$(t_2 - t_3) + (t_1 - t_4),$$

ou, puisque t_3 et t_1 sont invariables, la différence

$$t_2 - t_4$$

des températures extrêmes du cycle.

1. A consulter sur les machines à air: Armengaud. Etude sur la production mécanique du froid. 1874, Ledoux. — Théorie des machines à froid (*Annales des Mines*, juillet-août 1874). — Lightfoot. Machines for producing cold. air (Inst. of. Mechanical Engineers, janvier 1881). — J. Coleman. Refrigerating Machinery (*Inst of Civil Engineer, London*, 14 février 1882).

Pour $t_2 = t_4$ le rendement ainsi entendu serait, comme nous l'avons dit, infini ; mais la puissance frigorifique de la machine serait aussi tout à fait nulle : cette puissance, ou l'activité frigorifique, diminue en effet avec la chute de température. — Sous une autre forme, on obtiendrait théoriquement, en diminuant la détente de l'air, des coefficients économiques plus élevés, mais aussi des machines moins énergiques, de plus en plus encombrantes, plus coûteuses, et d'un rendement organique de moins en moins élevé, de sorte qu'il s'établit, bientôt entre ces divers facteurs de la valeur réelle de la machine, un équilibre dont on ne peut guère formuler l'équation, mais que la pratique ne tarde pas à préciser suffisamment pour chaque application particulière.

Dans la majorité des cas, on admet comme la plus avantageuse une détente de l'air variant de 2,5 à 3.

On suppose parfois que l'air décrit dans les machines frigorifiques le cycle de rendement maximum ou de Carnot, compris, comme on le sait, entre deux adiabatiques et deux isothermiques. — Dans ce cas, le coefficient économique de la machine frigorifique, inverse de celui du moteur à air chaud correspondant, est égal à :

$$\frac{T_4}{T_2 - T_4},$$

et le travail θ, nécessaire pour produire une calorie négative a'

$$\theta = 425 \frac{T_2 - T_4}{T_4}.$$

Il va sans dire que ces rendements ne sont jamais atteints en pratique par la raison que les machines à air ne fonctionnent jamais suivant un cycle de Carnot. Les compressions et les détentes adiabatiques sont en effet irréalisables à cause de la conductibilité des parois; et, lors même qu'on pourrait les réaliser, on n'aurait probablement aucun intérêt à employer le cycle de Carnot, qui conduirait, en raison de l'acuité des angles sons lesquels se coupent les adiabatiques et les isothermiques, à des machines de dimensions exagérées, perdant en résistances passives, en frais d'achat et d'entretien, tout le bénéfice thermique du cycle.

Dans la pratique, on n'opère pas, comme le suppose la théorie, la compression de l'air en deux phases : une compression adiabatique suivie d'un refoulement à pression constante grâce à un refroidissement du gaz comprimé; on effectue au contraire la compression d'un seul coup, autant que possible suivant une isothermique. En un mot, au lieu d'amener le point

figuratif du cycle de *a* en *c*, par le trajet *abc* (fig. 1), on l'y amène directement par *ac*, suivant une courbe se rapprochant autant que possible d'une isothermique. — On diminue ainsi le travail de compression d'une quantité représentée par l'aire du triangle *abc*, sans rien changer à la puissance de détente ou à l'énergie frigorifique de l'air définie par la position du point *c*.

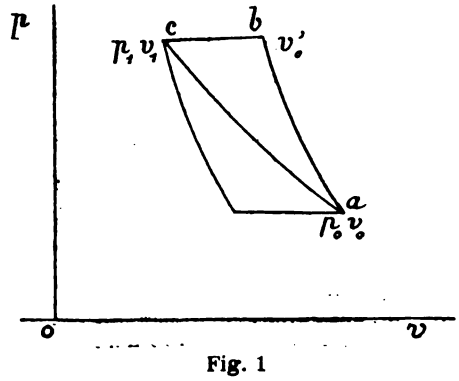


Fig. 1

Courbes réelles de compression et de détente. — Il faut, pour apprécier l'écart entre les courbes réelles de détente et de compression de l'air et les courbes théoriques, s'en référer aux diagrammes relevés sur les compresseurs et les détendeurs. — Les figures 2 et 3, dans lesquelles on a reporté, à côté des courbes théoriques, les courbes de diagrammes pris sur des machines à air de M. Lightfoot, nous fournit quelques renseignements à cet égard. — Pendant la compression, la courbe du diagramme BF se rapproche plus de la courbe adiabatique BD, correspondant à une élévation de température de 130 — 10 = 120°, que de l'isothermique correspondant à une élévation de température nulle. L'air employé renfermait 0,007 de vapeur d'eau en poids, ou 88 % de l'hygrométrie de saturation à sa température initiale de 10°.

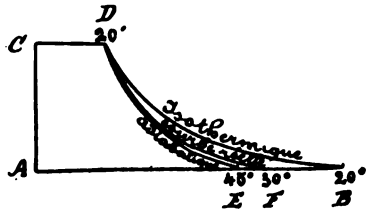


Fig. 2

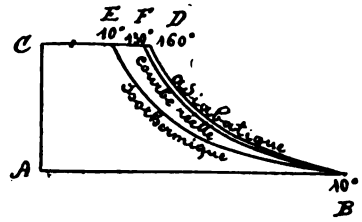


Fig. 3

Après sa compression, l'air était, dans cette machine, abaissé, par un réfrigérant convenable de 104 à 20°, point à partir du quel il se détendait (fig. 2), suivant une courbe plus rapprochée, comme cela doitêtre, de l'adiabatique DF que de l'isothermique DB, et tombait à une température de — 60°, plus élevée de 20° que la température limite correspondant à l'adiabatique [1].

L'humidité de l'air vient s'ajouter à la conductibilité plus ou moins parfaite des parois des cylindres compresseurs et détendeurs pour apporter dans l'allure des courbes de compression et de détente des perturbations impossibles à définir par le calcul, parce que la vapeur d'eau y subit des changements d'état indéter-

1. *Lightfoot.* « On machines for producing cold air » Inst. of Mechanical, *Engineers*, janvier 1881.

minées : une surchauffe partielle pendant la compression et une congélation partielle pendant la détente. Cette congélation, qui détermine une précipitation de la vapeur sous forme de givre, de glace ou de neige impalpable ne tarderait même pas, si l'on ne prenait les mesures nécessaires pour s'en débarrasser, à arrêter le fonctionnement de la machine. — Sans essayer de chiffrer exactement l'influence de l'humidité de l'air sur le rendement, on peut néanmoins définir son action : elle a pour effet d'élever la température de l'air détendu par sa chaleur de congélation, et de diminuer par conséquent le rendement d'autant plus que la détente ou la pression initiale de l'air est plus faible, compensant ainsi en partie, comme les résistances passives, l'avantage des faibles détentes et des chutes de température modérées.

On peut, il est vrai, éviter ces inconvénients de l'humidité de l'air en marchant à cycle fermé, avec une masse d'air toujours la même, desséchée une fois pour toutes; mais, tout en augmentant ainsi le rendement même de la machine, on n'obtiendrait que de mauvais résultats pour l'une des applications les plus rationnelles et des plus importantes de ces appareils : la production directe de l'air froid. La défectuosité inévitable de l'engin intermédiaire qu'il faudrait employer compenserait, et au delà, l'amélioration du rendement de la machines à air. Aussi les machines à air à cycle fermés ne sont elles peu répandues.

Refroidissement complémentaire. Emploi des régénérateurs. — Le refroidissement de l'air pendant sa compression, par une circulation d'eau autour des compresseurs, unique ou combinée avec une injection d'eau ne suffit pas; il faut le compléter par le passage de l'air au travers d'un refroidisseur interposé entre le compresseur et le détenteur, et disposé de manière à sécher l'air, c'est-à-dire, à le ramener à l'état hygrométrique correspondant à sa température et à sa pression à l'entrée du détendeur. — Ce séchage est nécessaire surtout avec les compresseurs à injection d'eau, où le volume de cette injection atteint environ le centième d'une cylindrée. Ces refroidisseurs peuvent prendre les formes les plus variées, mais la plupart sont constitués, sur le principe des condenseurs à surface des machines à vapeur, par une série de tubes ou de serpentins entourés d'une circulation d'eau froide et parcourus par l'air à refroidir.

On peut, comme nous l'avons déjà fait remarquer, compléter ce refroidissement au moyen de l'air froid qui s'échappe, imparfaitement utilisé, du bac à glace ou de la chambre refroidie par la machine. Il suffit de faire traverser, à l'air comprimé et déjà refroidi en partie par un premier appareil à circulation d'eau, un second condenseur à surfaces refroidies par l'air de la chambre froide. Cette solution très rationnelle, indiquée et appliquée par sir *William Siemens* dès 1857 [1], exige, pour être efficace, des surfaces de refroidissement très étendues, en raison du peu de conductibilité de l'air et de sa faible chaleur spécifique. On peut citer

1. Brevet anglais 2064 de 1857 et Siemens. Scientific works. Vol. II, p. 192.

parmi les inventeurs qui l'ont appliquée avec le plus de succès : MM. *Windhausen* (1) et *Bell-Coleman* (2).

MM. *Lightfoot* et *Hall*, dont les machines figuraient à l'Exposition, effectuent ce refroidissement d'une manière différente, dans un petit cylindre détendeur spécial, que l'air traverse avant d'arriver au grand cylindre, et au sortir duquel il abandonne la plus grande partie de son humidité en parcourant, entre le petit et le grand détendeur, un sécheur à chicanes disposées comme celles d'un antiprimeur de chaudières à vapeurs. — Nous décrirons plus bas en détail cette ingénieuse disposition en même temps que les machines de M. Hall.

Mais l'emploi des refroidisseurs sécheurs les plus efficaces ne peut jamais abaisser l'humidité de l'air au-dessous de l'état hygrométrique normal correspondant à sa pression et à sa température à l'entrée du détendeur principal ; de là, dans ce détendeur, formation d'un précipité de neige ou de givre, réduit sans doute au minimum, mais néanmoins assez important pour nécessiter, avec la plupart des machines à cycles ouverts, l'emploi d'appareils spécialement disposés pour évacuer méthodiquement cette neige. — Ces appareils, ou boîtes à neige — *snow-boxes* des anglais — consistent essentiellement en une capacité ou chambre de dépôt faisant suite au détendeur, pourvue de pointes, de rugosités ou de chicanes disposées de manière à y faciliter la précipitation de la neige et du givre qui s'échappent du détendeur. — On vide de temps en temps ces boîtes, qui doivent être facilement accessibles, et sur lesquelles les soupapes d'échappement du détendeur doivent s'ouvrir de manière à faciliter l'évacuation de la neige.

Parmi les moyens proposés pour augmenter le rendement des machines frigorifiques à air, il convient de citer, comme des plus intéressants et des plus rationnels en théorie, l'emploi de régénérateurs analogues à ceux des moteurs à air chaud, c'est-à-dire, constitués par des réseaux de toiles métalliques ou de briques perforées, plus actifs et moins encombrants que les refroidisseurs auxiliaires dont nous venons de parler. Malheureusement, ces régénérateurs présentent en pratique, aussi bien dans les machines frigorifiques que dans les moteurs à air chaud, de graves inconvénients : ils se rouillent et s'engorgent par l'humidité de l'air et les dépôts de givre — leur fonctionnement très imparfait et leur entretien difficile ont obligé les constructeurs à y renoncer, même pour les machines à cycle fermé, comme celles de *Kirk*, l'un des premiers inventeurs qui ait essayé l'application de ces régénérateurs aux machines frigorifiques (3).

Dans la machine de *Kirk* (fig.4) que nous ne pouvons que rappeler sans la décrire en détail, l'air, toujours le même, était alternativement comprimé puis détendu

1. Brevet anglais 669 de 1869
2. *Inst. of Civil. Engineers*, *London*, 14 février 1882.
3. Brevet anglais 1218 de 1862. *Inst. of Civil Engineers*, 1874, vol. XXXVII, p. 244 et 20 mars 1884.

par un compresseur spécial. Lors de sa compression, il passait dans un cylindre vertical, sous un gros piston déplaceur épais, non conducteur, et renfermant au centre les toiles métalliques du régénérateur : ce piston était alors au haut de sa course, et l'air comprimé se refroidissait à t_1° au contact du fond du cylindre rafraîchi par une circulation d'eau très active.— L'air comprimé, ainsi rafraîchi

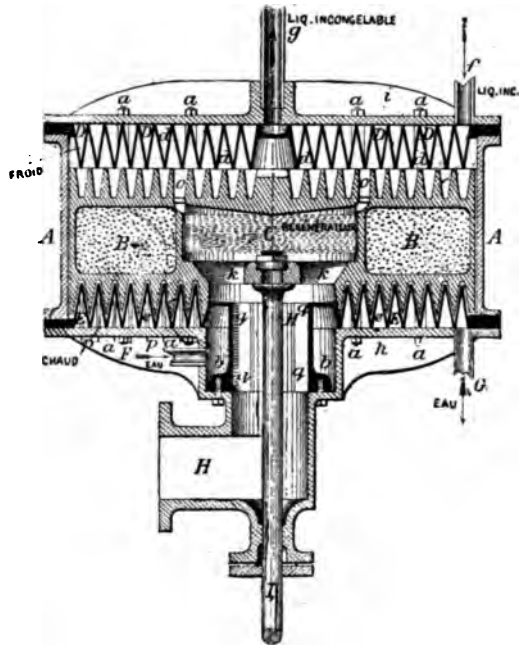


Fig. 4. — Régénérateur Kirk.

LÉGENDE. — B, Piston déplaceur non conducteur renfermant au centre le générateur à toiles métalliques C. Les deux faces du piston sont garnies de saillies circulaires qui viennent s'emboîter dans les canaux circulaires correspondants *d* et *e*, dont sont munis les fonds D et E du cylindre A. Ces canaux sont constitués par des tôles embouties galvanisées, aussi peu épaisses que possible, maintenues entre les brides du cylindre A et consolidées par des supports boulonnés *a*. Le fond inférieur E est rafraichi à *t*° par une circulation d'eau qui entre par *f* et sort par C. après avoir parcouru les canaux de circulation *e*, et circulé autour de l'enveloppe H*b* de la tige du piston I. Cette enveloppe est pourvue d'ailettes radiales *q q*, destinées à transmettre son froid à l'air comprimé chaud admis du compresseur au régénérateur par H, lorsque le piston B se trouve en haut de sa course. L'air comprimé se refroidit alors à t_1, au contact du fond E et des ailettes *q*. Le fond supérieur D est parcouru suivant *fg* par une circulation de liquide incongelable auquel l'air, refroidi à t_2 par sa détente lors du retour du piston compresseur, transmet son froid après avoir traversé le régénérateur C, par *ko*, à la descente du piston déplaceur B.

à t_1°, se détendait ensuite en traversant le régénérateur pendant la descente du piston déplaceur. Il communiquait sa température de détente t_2 au régénérateur, et refroidissait le liquide incongelable qui circulait dans le fond supérieur du cylindre, que l'on employait comme véhicule du froid. Lorsque le piston

déplaceur remontait, l'air détendu repassait au travers du régénérateur avant d'aller se recomprimer de nouveau au compresseur, et recommencer l'opération que nous venons de décrire. La machine de Kirk date de 1862 — elle constitue à peu près la seule tentative sérieuse d'application des régénérateurs aux machines frigorifiques à air : elle n'a pas réussi, malgré les détails de construction très ingénieux proposés par son inventeur, et cette idée n'a pas été reprise depuis. J'ai cru devoir néanmoins le signaler à nos lecteurs pour les avertir de la difficulté pratique de ce problème théoriquement fort simple, mais sans vouloir néanmoins décourager des essais dans cette voie, car on ne doit jamais désespérer de voir un jour se réaliser l'application heureuse d'une idée théoriquement exacte.

Quel que soit leur avenir, et nous ne pensons pas que l'on puisse améliorer beaucoup leur rendement, les machines à air se présentent comme des appareils d'un rendement très inférieur à celui de leurs analogues : les machines frigorifiques à gaz liquifiés par compression ; leur rendement organique ne dépasse guère 80 %, et leur rendement frigorifique une production de 1000 calories négative environ par cheval-heure indiqué au compresseur, et il faut faire passer dans les compresseurs environ 40 litres d'air par calorie négative. Ce ne sont là, bien entendu, que des données moyennes, suffisantes pour ne caractériser qu'en gros l'allure générale des machines frigorifiques à air.

Avant d'aborder l'analyse des principaux organes des machines à air, je signalerai quelques types dans lesquels on s'est écarté de la combinaison ordinaire de ces machines, composées d'un *compresseur*, d'un *refroidisseur* d'air comprimé, d'un *détendeur* et d'un *réfrigérant*. Telles sont les machines d'*Allen* (1) et de *Klein* (2) où l'air fonctionne entre des pressions élevées, 20^{atm} et 5^{atm}, de manière à diminuer l'encombrement, la machine de M. *Herbert Lloyd* (3) mixte, à air et à gaz ammoniac, dans laquelle l'air comprimé est, avant de passer au détendeur, refroidi par une vaporisation de gaz ammoniac liquéfié, et quelques machines, comme celles de *G. Sloper* (4) et de *Dugald Clerk* (5), où la compression puis la détente s'opèrent successivement, dans plusieurs cylindres disposés en cascade.

Principaux organes des machines à air

Nous allons, avant d'aborder la description proprement dite des principales machines à air, passer rapidement en revue les organes les plus importants de ces

(1) Brevet angiais 472 de 1882.
(2) id. 1944 de 1881.
(3) id. 1420 de 1883.
(4) id. 1522 de 1856.
(5) id. 3536 de 1881.

machines, qui sont communs à tous ces appareils.— Notre tache sera facile, car la plupart de ces organes procédent presque directement des mécanismes analogues, dont on trouve la description et l'étude approfondie dans les traités de mécanique générale, et dont ils ne diffèrent que par des détails d'adaptation.

Les principaux organes d'une machine frigorifique à air sont, comme cela résulte de leur définition générale :

le *compresseur ;*
le *refroidisseur et sécheur* d'air ;
le *détendeur* avec sa boîte à neige ;
le *réfrigérant.*

Compresseur. — Le compresseur peut être à simple ou à double effet ; on y distingue comme principaux éléments :

les *soupapes* et *distributeurs*,
les *garnitures* ou stuffing-box,
le *piston*,
les *moyens de refroidissement.*

Les compresseurs à double effet sont les plus fréquemment employés, surtout sur les navires, où l'encombrement doit être réduit le plus possible. A terre, où cette considération n'a pas la même importance, on préfère souvent les cylindres à simple effet, plus accessibles et sans autre garniture que celle du piston ; moins actifs, le refroidissement de l'air pendant la compression y est plus facile, et ils durent plus longtemps.

Les soupapes, ordinairement en fer ou en acier, sont en général pourvues d'un amortisseur des chocs, *dash-pot* ou autre : le dispositif des machine *Clerk* (1) (fig. 5) est l'un des mieux étudiés. Les soupapes de M. *Giffard* sont, comme nous le verrons plus bas, soit en acier battant par une seule ligne de contact sur un siège en bronze ou en caoutchouc (2), soit formées d'un corps en caoutchouc serré entre deux rondelles métalliques et appliqué sur le siège par la pression même de l'air comprimé, qui dilate le caoutchouc (3).

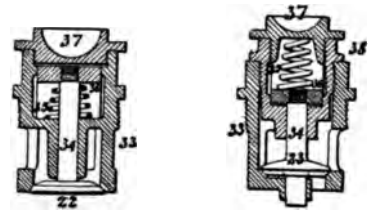


Fig. 5.— *Clerk. Soupapes d'aspiration et de refoulement*, 37, 38 bouchons qu'il suffit de dévisser pour avoir la soupape dans la main. 34, tige des soupapes 22 et 23 ; 25 ressort de rappel. 36 piston formant amortisseur des choc. 33 corps de la chapelle des soupapes vissé dans les fonds du cylindre compresseur.

Les soupapes d'aspiration du compresseur des machines de *Haslam* (4) sont, fig. 7 et 8, articulées à leurs tiges par un joint sphérique leur permettant de s'appliquer toujours exactement sur leur siège, qui est refroidi, comme celui des soupa-

1. Brevet anglais 3536 de 1881.
2. id. 3108 de 1877.
3. id. 2064 de 1875.
4. id. 3032 de 1883.

pes de refoulement, par une circulation d'eau. Il en est de même du siège des soupapes de M. *Matthews* (1), (fig. 8), qui sont formées par une large rondelle annulaire découpée en secteurs flexibles, occupant tout le fond du cylindre. Les

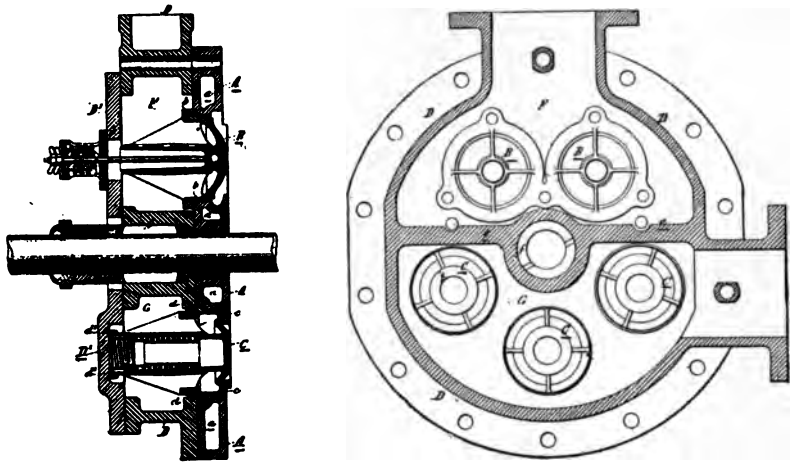


Fig. 6 et 7. — *Haslam*. BB, soupapes d'aspiration rappelées sur leurs sièges *b* par des tiges à articulations sphériques. CC, soupapes de refoulement ramenées sur leurs sièges *c* par une gaine *d*, à ressorts *d'*. *aa* circulation d'eau dans le plateau A. D, fond du cylindre divisé par la cloison *e* en deux chambres : une d'aspiration F et l'autre de refoulement G. D, regards boulonnés, permettant l'accès des soupapes.

soupapes du compresseur à double effet de *Chambers* (2), qui occupent aussi tout le fond du cylindre, sont montées sur un faux couvercle appliqué contre un garnissage en caoutchouc par un fort ressort; ce ressort cède aux coups d'eau, et permet de réduire sans danger l'espace nuisible au minimum.

Dans quelques compresseurs d' *Ellis*(3) les soupapes d'aspiration et de refoulement, annulaires (fig. 9) à gorge et très légères, sont à double siège et présentent à l'entrée et à la sortie de l'air de larges ouvertures sous une faible levée.

Quelques inventeurs [*Gorrie* (4), *Nehrlich* (5)] ont employé des soupapes commandées mécaniquement, dont les ouvertures sont plus promptes que celles des soupapes automatiques. D'autres constructeurs, comme M. *Lightfoot* (6), emploient dans certains cas des robinets analogues à ceux des machines Corliss ou des tiroirs, comme dans les machines de *Haslam* (7) et d'*Ellis* (8) ; mais

1. Brevet anglais 5648 de 1886.— *Industries*, 5 octobre 1888.
2. id. 605 de 1882. — *Engineering*, 7 avril 1882, p. 340.
3. id. 5274 de 1888.
4. id. 13224 de 1850.
5. id. 1873 de 1874.
6. id. 673 de 1882.
7. id. 1484 de 1880.
8. id. 4882 de 1885.

l'expérience ne paraît pas avoir encore suffisamment établi la supériorité de ces distributeurs sur les soupapes ordinaires.

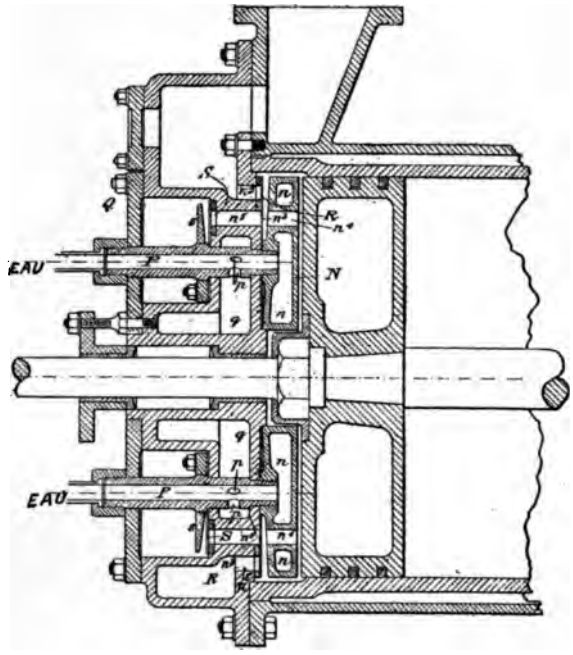


Fig. 8. — *Robert Mattheiws*

Une circulation d'eau amenée par les tuyaux P P, à trous *p*, traverse le fond *q* du cylindre et la plaque de garde N *n* de la soupape d'aspiration R. Cette soupape, constituée comme il est dit dans le texte, laisse l'air pénétrer de R au cylindre par les orifices n^3 n^4 : au retour du piston, l'air comprimé est refoulé par la soupape S, à garde *s*, au travers des orifices n^3 n^5.

Parmi les différents systèmes de *garnitures* proposés pour la tige du piston, nous n'avons guère à signaler que le *stuffing-box* à cuir embouti de M. *Giffard* (1), qui n'existe plus d'ailleurs sur la plupart de ses nouvelles machines.

La *garniture des pistons* de M. *Giffard* se compose essentiellement d'un segment en caoutchouc durci appliqué sur les parois du cylindre par la pression même de l'air refoulé (2). Cette garniture, qui peut être aussi formée de segments métalliques contre-butés par du caoutchouc (3), remplace avantageusement la garniture à rondelle coincée appliquée sur les premières machines de M. Paul Giffard (4).

Les *moyens de refroidissement* du compresseur consistent en une enveloppe à circulation d'eau, étendue parfois au couvercle et même au piston (5), et

1. Brevet anglais 2064 de 1875.
2. id. 3108 de 1877.
3. id. 2064 de 1875.
4. id. 2011 de 1871, 627 de 1873.
5. Sturgeon, Brevet anglais de 4863 de 1877.

combinée souvent avec l'emploi d'une injection d'eau pulvérisée, que l'on retrouve dans les machines les plus anciennes (1). M. *Kilbourn* rend l'action de la circulation d'eau plus efficace en faisant le cylindre intérieur de ses compresseurs en bronze, moins épais et plus conducteur que la fonte.

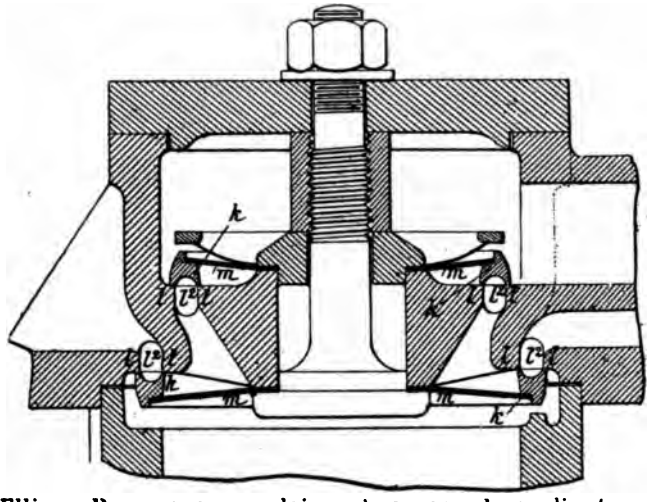


Fig. 9, *Ellis*. — R soupapes annulaires à gorges l_2, appliquées sur leurs sièges *l l* par des ressorts *m m*.

Refroidisseur-sécheur. — Le refroidissement de l'air au compresseur même ne suffit pas dans la plupart des cas : il faut alors achever ce refroidissement en soumettant l'air comprimé au contact de tubes à circulation d'eau froide ou à l'action d'une seconde injection d'eau. Dans ce dernier cas, le refroidisseur doit être forcément suivi d'un sécheur, pour débarrasser l'air de son excès d'eau avant son entrée au détendeur. Tel est le cas des machines de *Teal* et *Fryer* (2), *Laidlaw* et *Robertson* (3), *Bell* et *Coleman* (4).

Quant aux tubes des refroidisseurs, souvent en cuivre, ils sont parfois annulaires (5) ou croisés (6) pour en multiplier les surfaces. M. *Chambers* refroidit l'air du compresseur en lui faisant traverser plusieurs faisceaux consécutifs de tubes en U, libres de se dilater, et autour desquels circule le liquide réfrigérant, de sorte que la surface entière des tubes est également utilisée (7). M. *Clerk* remplace (fig. 10) les tubes par une série de gros cylindres concentriques fermés à un bout seulement, emboîtés les uns dans les autres avec des jeux où circulent alternativement l'air comprimé et l'eau de refroidissement (8).

1. Gorie, brevet anglais 13234 de 1850. — Teal et Fryer, brevet anglais 3957 de 1879.
2. Brevet anglais 3957 de 1879.
3. id. 2666 de 1864.
4. *Inst. of Civil Eng.*, 20 mars 1884.
5. Bryce-Douglas, brevet anglais 1188 de 1880.
6. Allen, brevet anglais 3788 de 1880.
7. Brevet anglais 605 de 1882. — *Engineering*, 7 avril 1882, p. 320.
8. id. 3536 de 1881.

Les tubes peuvent être, en totalité ou en partie, refroidis par un courant d'air froid venant soit en partie directement du détendeur et en partie du réfrigérant, comme dans les machines de *Windhausen* (1) et de *Haslam* (2), soit en totalité par le retour du réfrigérant au compresseur, comme dans les machines de *Bryce-*

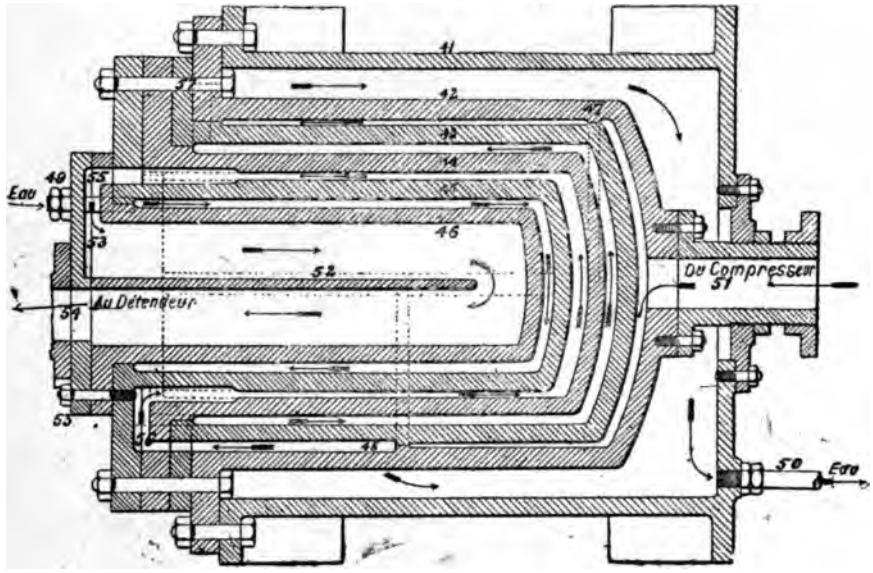


Fig. 10, *Clerk*. — 41...46 Tubes emmanchés les uns dans les autres en réservant entre-eux des espaces annulaires où circulent en sens contraire l'air comprimé, allant du compresseur au détendeur suivant le trajet 51, 53, 52, 54), et l'eau de circulation suivant 49.... 50.

Douglas (3), *Northcott* (4), *Ellis* (5) et *Matthews* (6). Dans les machines de *Bell* et *Coleman*, l'air rafraîchi au sortir du compresseur par un arrosage achève de se refroidir, en même temps qu'il se sèche, par son passage au travers d'une série de tubes renfermés dans la chambre froide ou réfrigérant (7). Dans les machines de *Lightfoot*, au contraire, ce refroidissement supplémentaire s'opère (fig. 11, 12 et 13) dans un petit détendeur spécial, que l'air traverse avant d'arriver au grand détendeur, et au sortir duquel il abandonne la majorité de son eau en parcourant, entre les deux détendeurs, une série de chicanes disposées comme celles d'un antiprimeur (8). Ces deux modes de refroidissement complémentaire sont théoriquement équivalentes, mais le procédé Lightfoot comporte des appareils moins encombrants et plus simples.

1. Brevet anglais 669 de 1869.
2. id. 5060 de 1880.
3. id. 1188 de 1880.
4. id. 4051 de 1882.
5. id. 4882 de 1885.
6. id. 5648 de 1886.
7. id. 1034 de 1877.
8. 4065 de 1880 *Inst. of Mechanical Eng.*, 4 janv. 1881.

Nous ne ferons que signaler le dispositif de séchage proposé par M. *Nehrlich*, où l'air comprimé, préalablement refroidi, se débarrasse de la majeure partie de son humidité par un refroidissement complémentaire dans l'enveloppe du cylindre détendeur (1).

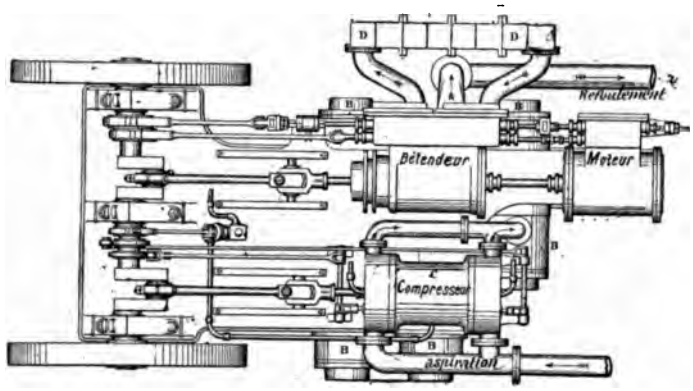


Fig. 11. — Ensemble de la machine

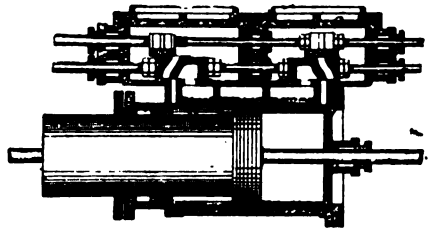


Fig. 12. — Cylindre détendeur

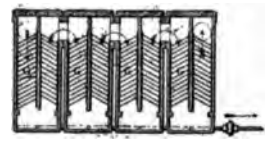


Fig. 13. — Sécheur intermédiaire

Fig. 11, 12 et 13. — *Machine Halt et Lightfoot*

L'air refoulé par le compresseur à double effet C, à une pression absolue de 4 kil. 5 environ, dans les refroidisseurs tubulaires B, commence à se détendre dans l'espace annulaire ménagé autour du fourneau à l'avant du cylindre détendeur E, où sa température s'abaisse à 0° environ : de là, il passe au travers des chicanes G (fig. 13) du sécheur intermédiaire D, où il dépose la moyenne partie de son humidité, et d'où il passe à l'arrière du cylindre E, pour y achever sa détente. Le cylindre moteur A est conjugué au cylindre E de manière que la détente de l'air aide son travail.

Détendeur. — Les principaux organes du cylindre détendeur sont les mêmes que ceux du compresseur. On y trouve, comme moyens de distribution, les soupapes automatiques ou desmodromiques (2), les robinets (3) et les tiroirs (4) plans ou cylindriques équilibrés (5).

1. Brevet anglais 1873 de 1874.
2. Inglis, brevet anglais 3340 de 1877.
3. Matthews. 5648 de 1886.
4. Haslam, de 1484 de 1880.
5. Ellis, de 4882 de 1885.

La détente est souvent réglée automatiquement en fonction de la pression finale au compresseur. Tel est le cas des machines de *Teal* et *Fryer* (1), de *Dugald Clerk* (2) et de *Wilson* et *Sturgeon* (3). Dans plusieurs machines, le détendeur est, en outre, pourvu d'un reniflard empêchant la pression d'y tomber au-dessous de celle de l'atmosphère.

Afin de réduire ses frottements au minimum, la soupape d'admission du détendeur de M. *Sturgeon* est (fig. 14) maintenue sur son siège par un disque-membrane en acier dont elle traverse le milieu.

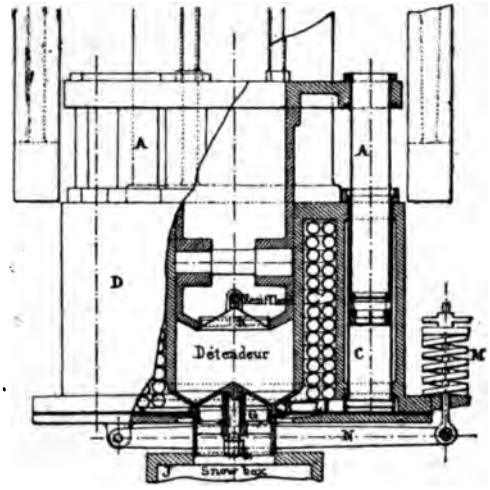


Fig. 14. *Sturgeon.—Compresseur à cylindres multiples.* AA pistons compresseurs en bronze, à cylindres C disposés autour du détendeur dans une enveloppe D.

Quand le piston du détendeur descend, dès que la pression de l'air détendu atteint celle de l'atmosphère, il repousse la soupape d'échappement G, malgré le ressort L, et s'échappe dans le *snow-box* J. Vers la fin de sa course, le piston repousse et ouvre la soupape d'admission O, dont ce mouvement ferme G, et qui reste, à la montée du piston, ouverte pendant une fraction de la course ascendente réglée par la tension du ressort M.

Les soupapes des machines *Giffard* de 1877 reposent sur leur siège par une arrête tranchante, coupant à chaque coup la glace qui tendrait à s'y déposer, et celles des machines de *Hesketh* sont disposées de manière à en faciliter le dégagement vers la boîte à neige, qui suit presque toujours immédiatement le détendeur (4).

Ces *boîtes à neige* (snow-box), utiles dans toutes les machines à air, sont

1. Brevet anglais 3957 de 1879.
2. id. 3536 de 188
3. id. 91 de 1883.
4. id. 3989 de 1881.

indispensables à celles qui ne sont pas pourvues d'un refroidisseur-sécheur spécial ; elles consistent essentiellement en une capacité faisant suite au détendeur, dans laquelle l'air refroidi dépose sa neige ou sa glace de condensation sur des surfaces rugueuses, pourvues de pointes (1), ou mieux disposées en chicanes (2). On a proposé, pour éviter les *snow-box* sans avoir recours aux moyens précités, divers artifices, tels que l'injection au détendeur d'air comprimé (3) ou de liquide incongelable (4). Ces moyens exceptionnels sont en général compliqués et préjudiciables au rendement de la machine.

Réfrigérant. — Le réfrigérant des machines à air ne présente guère de particularités intéressantes qu'en raison de ses adaptations à des applications spéciales, dont la plus importante est la conservation des viandes, que nous étudierons dans un autre chapitre.

Les réfrigérants des machines à cycle fermé sont parfois pourvus d'un reniflard ou d'un régulateur de pression, constitué, par exemple, comme celui de *Windhausen*, par une poche en caoutchouc jouant le rôle d'accumulateur (5).

Quelques inventeurs, *Williams* notamment, ont proposé, mais sans succès, d'opérer la réfrigération par la détente directe de l'air comprimé au travers d'un liquide incongelable (6) : il se produisait des commencements de congélation, et la majorité du travail de détente se dissipait hors du liquide ou par des remous qui le réchauffaient.

Principaux types de machines à air

Windhausen (7). — La première machine à air de M. Windhausen date de 1869, et n'est plus employée aujourd'hui que très rarement dans l'industrie. Nous croyons néanmoins utile de la décrire sommairement à cause de son importance historique.

Cette machine, très remarquable pour son époque, est à cycle fermé; son objet principal — erroné en ce qui concerne le rendement — était, non pas de produire de l'air froid directement utilisable comme air froid, mais de faire de la glace au moyen de l'air refroidi. — L'air, toujours le même, comprimé sur l'une des faces d'un long piston non conducteur, est, dans cette machine de Windhausen, détendu sur l'autre face du piston, après s'être refroidi sur deux séries de

1. Sturgeon, brevet anglais 91 de 1883.
2. Hargreaves et Inglis, brevet anglais 1747 de 1878.
3. Northcott, brevet anglais 4052 de 1882.
4. Gorrie, brevet anglais 13234 de 1850.
5. Brevet anglais 669 de 1869.
6. id. 147 de 1853.
7. Brevets anglais 669 de 1869, 3142 de 1873, 4762 de 1876.

tubes rafraîchies l'une par un courant d'eau, l'autre par de l'air froid revenant du bac à glace, ou pris directement à la sortie du détendeur.

Le piston non conducteur B (planche I et II) d'une épaisseur presque égale à sa course, aspire l'air par le clapet *b* et le refoule, par *a*, au travers du tuyau J_1 et des tubes du refroidisseur F, qui l'amène par J à l'aspiration a_1 du détendeur constitué par l'arrière du cylindre A. La soupape d'admission a_1 se ferme en un point de la course qui détermine le degré de détente ; l'air froid et détendu s'échappe, par la soupape b_1, partie au refroidisseur F, au travers du tuyau J_2, partie au bac à glace, par le tuyau J_5, puis du bac à glace au réfrigérant par J_3; enfin, ces deux parties de l'air froid reviennent à l'aspiration *b* du compresseur par le tuyau J_4.

Le refroisseur F est divisé en deux parties F_2 F_3 par une chambre tubulaire F_1, traversée par les tubes. La première partie F_2 est rafraîchie par la circulation d'eau qui refroidit l'avant compresseur du cylindre A ; la seconde partie F_3 est rafraîchie par l'air froid amené directement au détendeur par J_2, et du bac à glace par J_3.

Les proportions d'air admises au refroidisseur F par j_2 et par j_3 sont réglées à volonté par la manœuvre du robinet *p*, qui permet de graduer ainsi la température finale de l'air, d'autant plus basse, entre certaines limites, que l'on en dérive une proportion plus grande directement du détendeur au refroidisseur.

L'arrière détendeur du cylindre A est enveloppé d'une matière non conductrice et séparé de l'avant compresseur par un espace vide *c*, qui empêche ou, du moins, diminue considérablement les échanges de température par les parois.

Les moulceaux du bac à glace, enveloppés de liquide incongelable, sont séparés par des chicanes en bois H_2, destinées à uniformiser la distribution de l'air froid sur les moulceaux.

L'intérieur du bac à glace communique avec une poche en caoutchouc *z*, destinée à servir de régulateur de pression à l'air du bac; quand cette pression tend à s'élever au-dessus de celle de l'atmosphère, la poche se gonfle ; l'inverse a lieu quand la pression s'abaisse, de sorte que la pression du bac reste sensiblement égale à celle de l'atmosphère.

Les soupapes a_1 b_1 du détendeur sont commandées mécaniquement par la tringle S' et les leviers S_4.

Les fuites d'air sont récupérées automatiquement au travers du renifflard R, qui laisse, lorsque la pression du bac s'abaisse malgré la poche z_1, de l'air pénétrer de l'atmosphère au compresseur, après s'être filtré et desséché sur une couche de chlorure de calcium.

M. Windhausen a construit depuis, un certain nombre de machines plus simples, à cylindres détendeurs et compresseurs séparés, mais moins ingénieuses que sa première machine. — Enfin, en 1876, il a proposé la machine représentée shé-

matiquement par la figure 15, qui se distingue aussi par quelques particularités nouvelles.

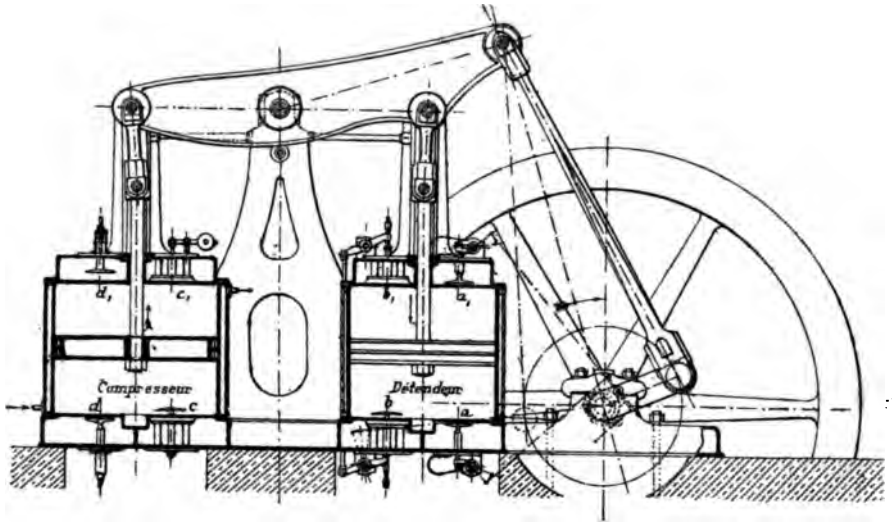


Fig. 15. *Windhausen* (1876). — Machine à air avec compresseur et détendeur à double effet conjugués par un balancier. aa_1 dd_1 soupapes d'aspiration. bb_1 cc_1 soupapes de refoulement desmodromiques.

La machine est à cycle ouvert et comprend deux cylindres à double effet : un compresseur et un détendeur. Lorsque le piston du détendeur monte, il aspire de l'air par la soupape *a*, qui se ferme mécaniquement au point de détente ; puis l'air détendu passe, à la descente du piston, par la soupape *b* et le tuyau D (fig. 16), dans la chambre du réfrigérant, ou chambre froide. De cette chambre, l'air froid passe par le tuyau L, les tubes du refroidisseur G et le conduit M à l'aspiration *d* du compresseur (fig. 15) qui l'expulse par *c*, après l'avoir ramené à la pression atmosphérique.

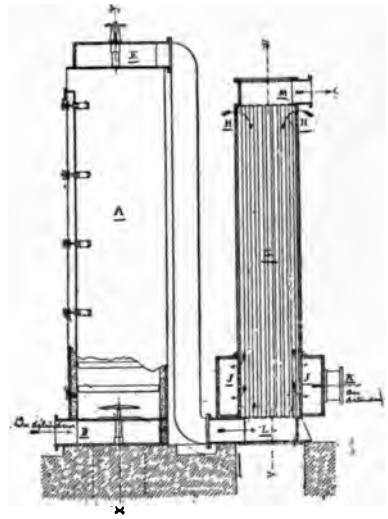
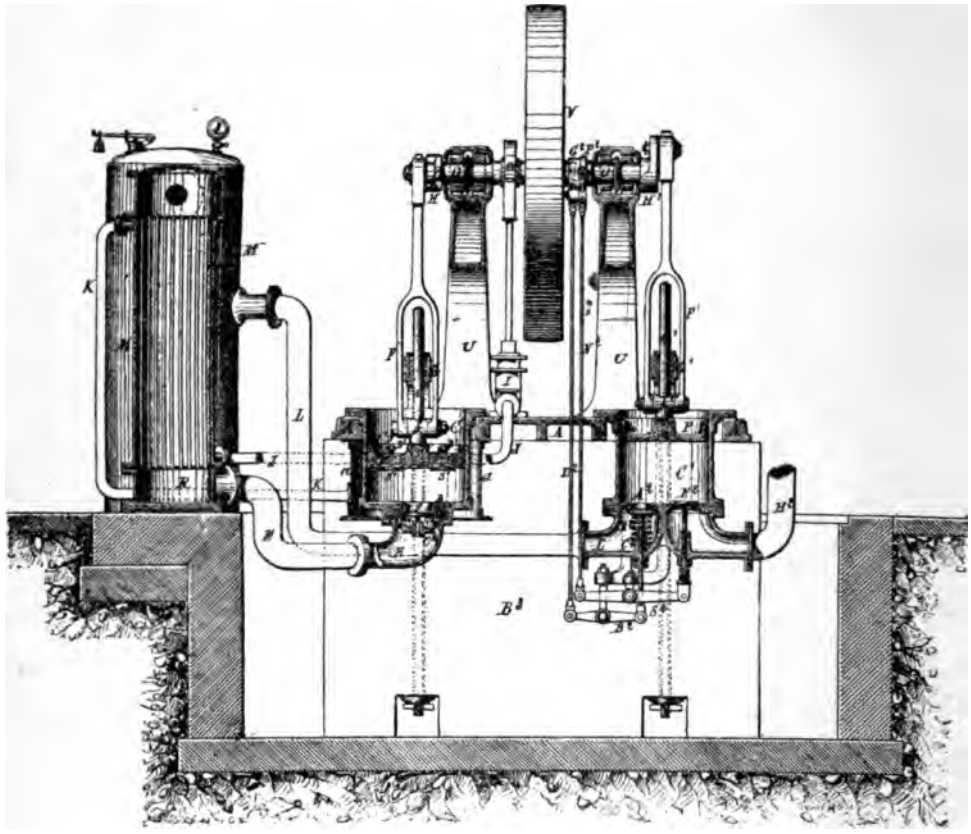


Fig. 16. *Windhausen* (1876). - A chambre froide recevant en D l'air du détendeur et l'ammenant, par ELM, au compresseur, au travers des tubes G, autour desquels l'air aspiré au détendeur, suivant H J K, va se refroidir avant sa détente.

L'air nouveau aspiré au détendeur y est amené par le tuyau K et les ouvertures H (fig. 16) tout autour des tubes G, sur lesquels il dépose, en se refroidissant, la majeure partie de son humidité.

L'air du compresseur échauffé par la



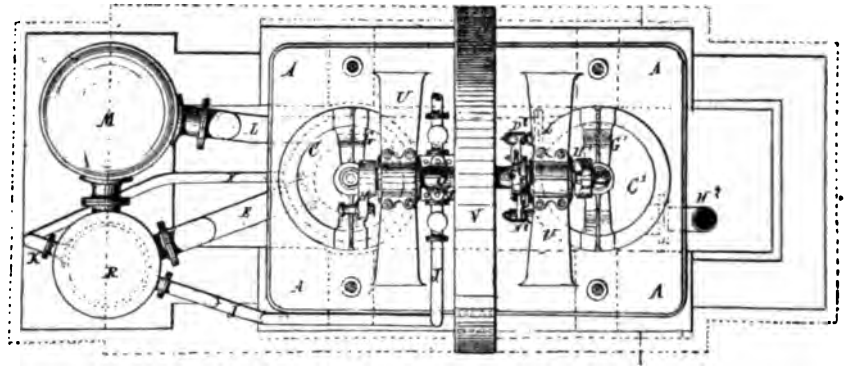


Fig. 17. — *Machine Giffard verticale, 1877.*

C. C_1 cylindres compresseur et détendeur à simple effet, à pistons conjugués par les manivelles HH' calées à 90° sur l'arbre moteur *oo'*, conduit par la poulie V et porté par les batis UA. Les tiges *c c'* des pistons sont attaquées par des bielles à fourche FF' et guidées par des étriers GG'. SS', soupapes d'aspiration du compresseur (fig. 19) S, soupape de refoulement (fig. 18), R refroidisseur à tubes rafraichis par une circulation d'eau (IKJ) et parcourus par l'air comprimé admis par E. M, réservoir accumulateur d'air comprimé le recevant refroidi de R, et l'amenant par L à l'aspiration du détendeur. A^2 E^2, soupapes d'aspiration et de refoulement du détendeur actionnées par les mouvements (G^2 D_2 B_2) (P_2 N_2 S_2). H^2, échappement de l'air du détendeur à la chambre froide.

compression peut-être employé au chauffage, mais le compresseur peut-être néanmoins rafraîchi par une circulation d'eau.

L'objet principal de M. Windhausen, en étudiant cette machine, paraît avoir été de se dispenser d'un condenseur à circulation d'eau; mais on arrivait ainsi à des appareils très volumineux, qui ne se sont pas répandus.

Machines Giffard (1)

Les machines à air de M. Paul Giffard, que l'on peut considérer comme un initiateur de cette matière, datent de 1873 : elles ont été très remarquées à l'Exposition de 1878, souvent initiées depuis, et tiennent encore aujourd'hui dans leur spécialité, un rang des plus honorables.

Les types des machines Giffard sont très nombreux; le plus répandu en France est le type vertical, représenté par les figures 17, dont un exemplaire fonctionnait à l'Exposition de 1889, dans la section des produits alimentaires.

Les cylindres compresseur C et détendeur C_1, conjugués par des manivelles à 90°, sont à simple effet. L'air aspiré au compresseur au travers des soupapes $s_1 s_1$ du piston est refoulé, par la soupape S_1 et le tuyau E, au travers des tubes du condenseur à surfaces R, ou réfrigérant, d'où il passe au réservoir de pression M. L'air comprimé et froid passe ensuite du réservoir M, par le tuyau L, à la soupape d'aspiration A^2 du détendeur. Cette soupape se ferme mécaniquement au point voulu pour la détente, après laquelle l'air est évacué du détendeur par la soupape E_2 et le tuyau H_2.

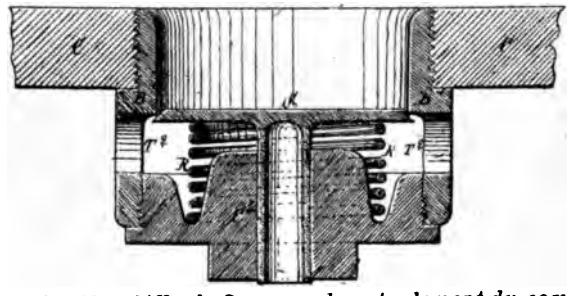


Fig. 18. — Giffard. *Soupape de refoulement du compresseur* D fond du cylindre. B siège en bronze, S soupape en acier à tige creuse D', appliquée sur son siège par un ressort R. $T_2 T_2$ orifice de refoulement de l'air comprimé.

La soupape de refoulement du compresseur S se compose (fig. 18) d'un disque en acier très léger, à tige creuse, battant par une simple circonférence de contact presque linéaire sur un siège en bronze vissé dans le fond du cylindre et percé des ouvertures nécessaires à l'évacuation de l'air refoulé.

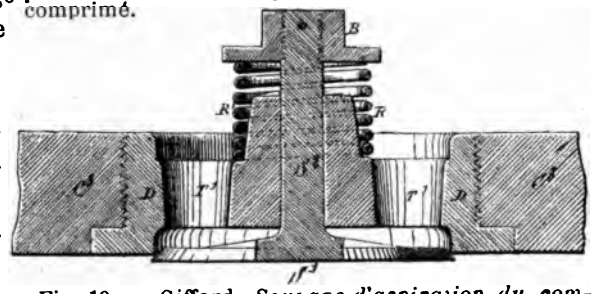


Fig. 19. — Giffard. *Soupape d'aspiration du compresseur.* C^3 corps du piston — D, siège en bronze à la soupape S_1 à tige S^2 et à ressort R^1, pressant sur l'écrou B^1. T^1 T^1 orifices d'aspiration.

Les soupapes d'aspiration (fig. 19), également

1. Brevets anglais 627 de 1873, 2064 de 1875, Ledoux. *Théorie des machines à froid. Revue industrielle* 1881 p. 233. *Bulletin de l'industrie minérale* juin 1876 The Engineer, 6 juillet, 17 aout 1883.

très légères, sont construites d'une manière analogue. Leur tige est hexagonale (fig. 20).

Le piston du cylindre de compression a pour garniture un anneau de caoutchouc double (fig. 21) doux à l'intérieur et durci à l'extérieur, appliqué par la pression même de l'air, qui agit par les trous T.

Les soupapes d'admission et d'échappement du détendeur, également en acier et très légères, battent sur des sièges en caoutchouc durci : celles d'échappement par une zône linéaire très étroite, de manière à couper la glace qui s'y déposerait par le refroidissement de l'air.

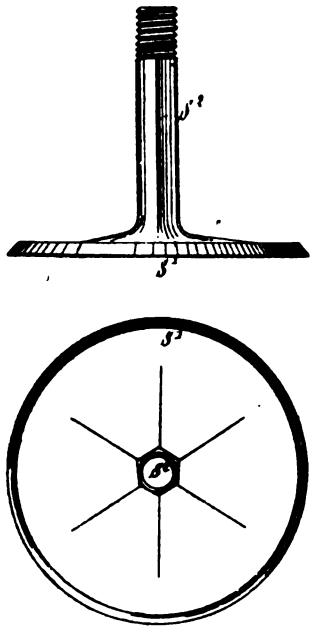


Fig. 20. — *Giffard.*— Détail d'une soupape d'aspiration du compresseur S^2, à tige hexagonale S^3.

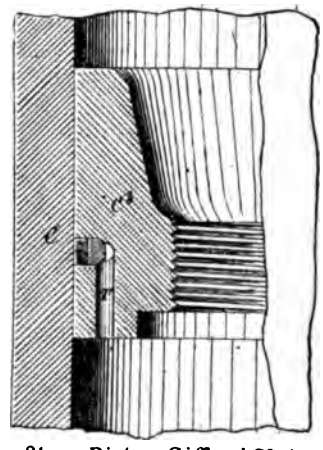


Fig. 21.— *Piston Giffard* C^3, à garnitures mixte en caoutchouc C, appuyée par la pression de l'air en T.

Les soupapes du détendeur sont conduites desmodromiquement par des cames qui permettent de régler à volonté l'admission et, par suite, la détente, dont le travail vient aider, comme on le voit, celui de la poulie motrice. On peut donc, avec cette machine, régler à volonté, et dans des limites très étendues déterminées par les dimensions mêmes des cylindres compresseur et détendeur, le degré de détente ou l'intensité du froid produit.

M. Ledoux, qui a établi une théorie complète de la machine Giffard, a donné, pour le rendement théorique d'une machine de ce type fonctionnant sans espaces nuisibles, avec de l'air à l'état hygrométrique 1/2, le tableau suivant, par mètre cube d'air pris à 15°, et en supposant un rendement organique de 92 %.

Un espace nuisible de 4 % des cylindrées diminuerait de 100 calories par cheval théorique le rendement de la machine.

Comme on le voit, la machine Giffard, obéissant à la loi générale des machines frigorifiques, a un rendement d'autant moindre que la chute de tempé-

rature (t_1-t_2) est plus élevée, ou le refroidissement plus intense et la pression finale plus haute au compresseur.

Pression au réservoir M.	Température finale t_1 au compresseur.	Température finale t_2 au détendeur.	Chute de température $t_1 - t_2$	NOMBRE de calories négatives obtenues.	NOMBRE DE CALORIES NÉGATIVES par kilogrammètre théorique.	par cheval-heure théorique.	par kilogrammètre effectif	par cheval-heure effectif.
1atm 1/2	51°,04	— 0,43	15°,43	4455	0,01531	4134	0,00454	1226
2	79 31	21,70	36 70	10600	0,00843	2276	0,00436	1117
2 1/2	102 93	37,25	52 25	15090	0,00660	1782	0,00393	1061
3	123 39	50,80	65 80	18997	0,00545	1472	0,00355	939
3 1/2	141 57	61,53	76 53	22095	0,00481	1299	0,00328	886
4	157 98	70,58	85 58	24710	0,00435	1176	0,00307	829
4 1/2	173 00	78,26	93 26	26928	0,00409	1104	0,00290	783

La figure 22 représente une machine verticale Giffard. Le refroidisseur R, et le réservoir de pression M y sont juxtaposés, au lieu de se trouver côte à côte, Un appareil de ce type, de 18 chevaux, peut fournir environ 650 mètres cubes

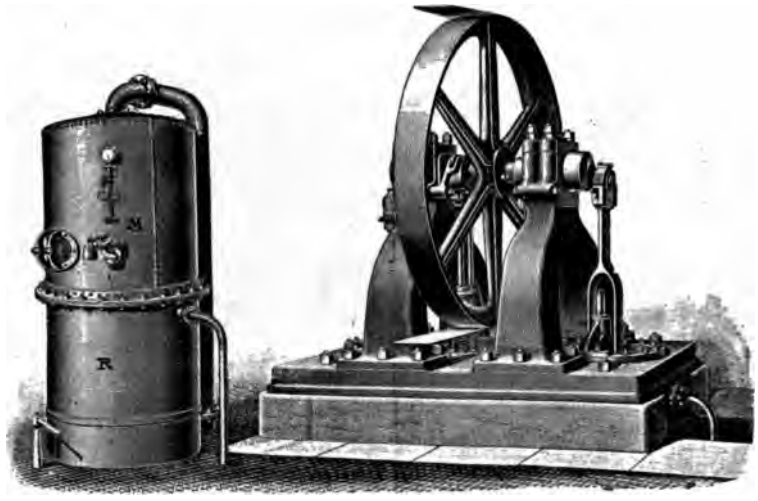


Fig. 22. — *Giffard*. Machine type symétrique.
M réservoir de pression, R refroidisseur

d'air à 0° par heure, ou 100 kilogrammes de glace, soit environ 10,000 calories négatives utilisées, ou 550 calories par cheval, chiffre notablement inférieur, comme il fallait s'y attendre, au rendement théorique.

Ainsi que nous l'avons dit, la machine de M. Giffard peut revêtir les formes

les plus diverses, suivant ses adaptations : les figures 23 à 26 en présentent quelques exemples.

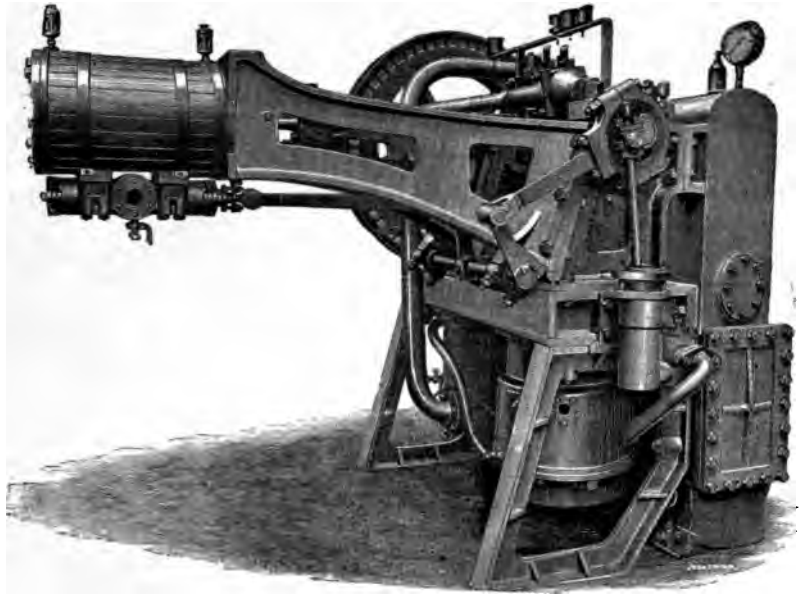


Fig. 23 — *Giffard* machine type marin de 140 mètres cubes.

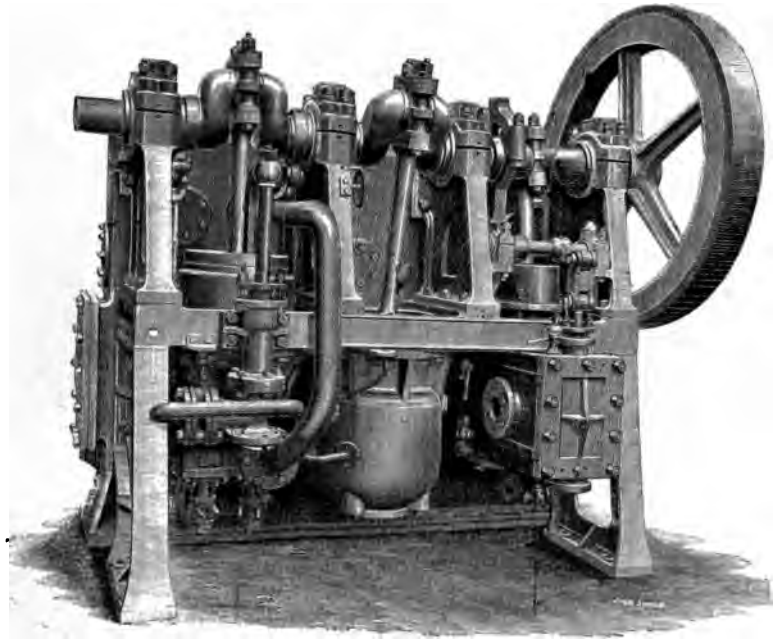
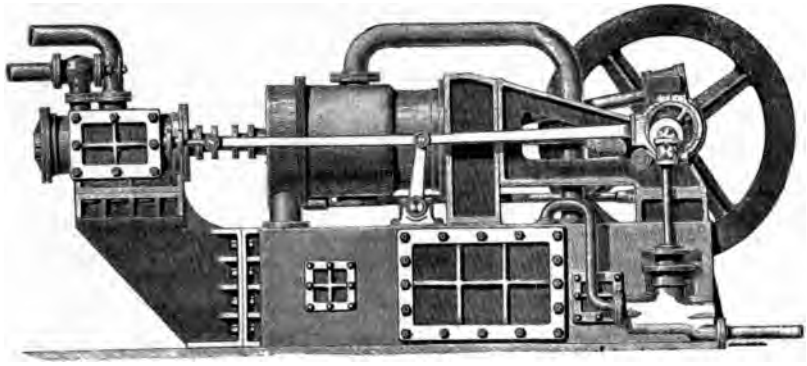


Fig. 24. — *Giffard* type marin de 200 mètres cubes.



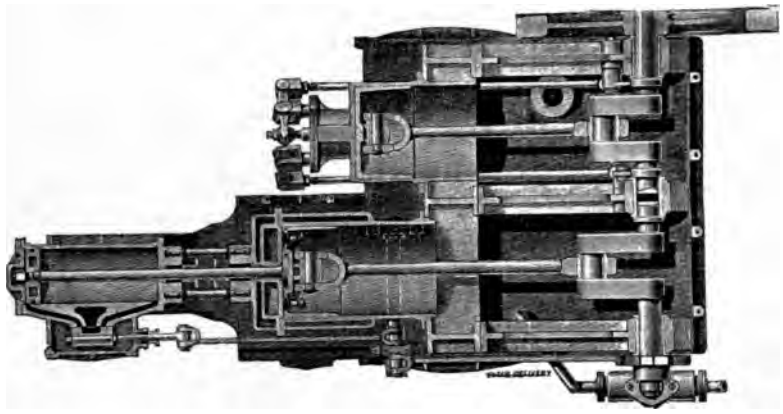


Fig. 25 et 26. — *Giffard,* Machine horizontale de 600 mètres cubes,

La machine représentée par la fig. 23 a son refroidisseur et son réservoir d'air groupés dans un cadre vertical appuyé sur la muraille du navire. — Les cylindres compresseurs et détendeurs ont 330 millimètres de diamètre, et débitent par heure 140 mètres cubes d'air à —50°.

La machine représentée par la fig. 24, à cylindres de 400×400, fonctionne sur des navires de la *Peninsular and Oriental C°*, et débite, à 120 tours, 300 mètres cubes d'air à —40°.

Ainsi qu'on le voit, dans ces deux machines, le moteur à vapeur est ingénieusement groupé sur un même bâtis, avec leurs cylindres à air, le condenseur,

Fig. 27. — *Giffard,* Machine de 60 m.

le réservoir d'air, et la pompe de circulation, en un ensemble à la fois compact et accessible.

La machine représentée par les figures 25 et 26 est plus importante; elle débite, avec des cylindres de $500^{mm} \times 500$ et de 500×630, environ 600 mètres cubes d'air par heure, à — 40°, à la vitesse très modérée de 100 tours par minute. — Le cylindre à vapeur a $300^{mm} \times 630$ de course.

Pour les faibles puissances, 60 mètres cubes, on préfère le type à cylindres inclinés représenté par la figure 27.

MACHINES BELL & COLEMAN (1)

Bell-Coleman. — Les machines de MM. *Bell* et *Coleman* sont destinées principalement au refroidissement et à la conservation des viandes par l'air froid. Dans la machine de 1877, l'air comprimé est refroidi par une injection d'eau au compresseur d'abord, puis dans un saturateur à toles perforées arrosées d'eau. De là, il traverse, pour se sécher, un antiprimeur à chicanes, qui est comme la contre-partie du saturateur, puis une série de tubes inclinés vers le fond de l'antiprimeur, et parcourant sur une grande longueur la chambre froide. L'eau que l'air comprimé dépose dans ces tubes en se refroidissant, s'évacue ainsi naturellement par le bas du sécheur. Au sortir de ces tubes, l'air refroidi et débarrassé de son excès d'eau passe au détendeur, qui l'envoie dans la chambre froide.

La machine de 1883, spécialement destinée aux navires, est remarquable par la compacité et l'harmonie de son ensemble. L'appareil, tout en double (moteur compresseur et détendeur), est formé de deux mécanismes complets, qui peuvent fonctionner en compound ou indépendamment en cas d'accident à l'un d'eux. Le bâti qui les supporte renferme les pompes à air et le condenseur des cylindres à vapeur, ainsi que les boîtes à neige, disposées sous les détendeurs, où l'air passe avant d'arriver dans la chambre froide.

Les machines Bell-Coleman sont très répandues à bord des navires, et notamment sur les lignes d'Australie, où elles donnent toute satisfaction.

Les figures 28 à 31 représentent l'ensemble et les principaux détails de la machine Bell et Coleman de 1878.

Les compresseurs à double effet, au nombre de quatre, sont placés de front derrière les cylindres détendeurs D et les cylindres moteurs V.

Ils sont refroidis par une injection d'eau alimentée par les pompes I, et refoulent leur air dans une conduite générale R aboutissant, par D', au refroidisseur A, constitué (fig. 32) par une série de tôles perforées H_1, arrosées d'eau

1. Brevets anglais 1034 de 1877. 3862 de 1878. 4191 de 1879. 3625 de 1881. 638 de 1882. 5507 de 1883. *Inst. of Civil Engineers London*, 14 fév. 1882 (J.J. Coleman. *On air refrigerating Machinery*). *The Engineer*, 9 sept. et 18 nov. 1887, p. 219 et 410. 14 avril 1882, p. 267.

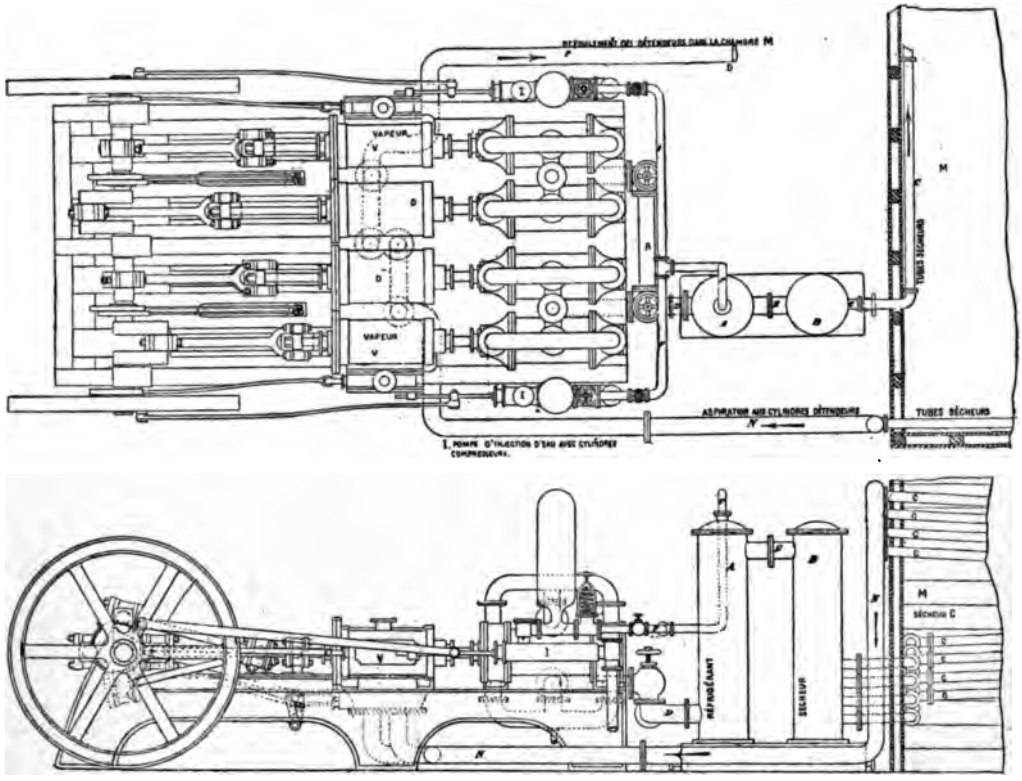
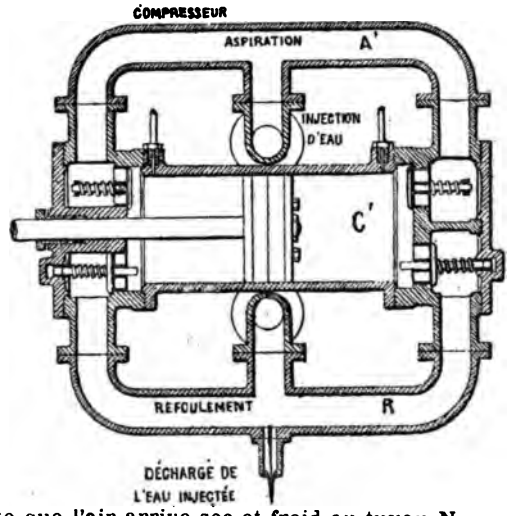


Fig. 28, 29, 30. — Machine Bell-Coleman de 1878.
Ensemble de la machine et détail d'un compresseur.



Les deux cylindres à vapeur V commandent quatre compresseurs C' et deux détendeurs D. Des pompes I injectent aux extrémités des compresseurs de l'eau qui opère un premier refroidissement de l'air comprimé, lequel se rend par les tuyaux R et D dans un refroidisseur A, constitué par une colonne remplie de tôles perforées horizontales arrosées d'eau froide par le tuyau F. L'air, qui traverse ces plaques de bas en haut, se refroidit au contact de l'eau et arrive, froid et très chargé d'eau, par E, dans le sécheur D, constitué, comme A, d'une colonne de tôles perforées sur lesquelles l'air dépose la majeure partie de son eau entrainée. Du bas du sécheur B, l'air se rend dans les tubes *cc* renfermés dans le réfrigérant ou chambre froide M, et dont la basse température précipite presque toute son humidité qui s'évacue par une purge, de sorte que l'air arrive sec et froid au tuyau N qui le conduit à l'aspiration des détendeurs D, d'où il se rend, après sa détente, par le tuyau P, à la chambre froide M.

froide en F, et que l'air traverse de bas en haut. Au sortir du refroidisseur, l'air passe, par E, au sécheur B, constitué, comme A, par une colonne de tôles perforées que l'air traverse de haut en bas en y déposant la majorité de l'eau

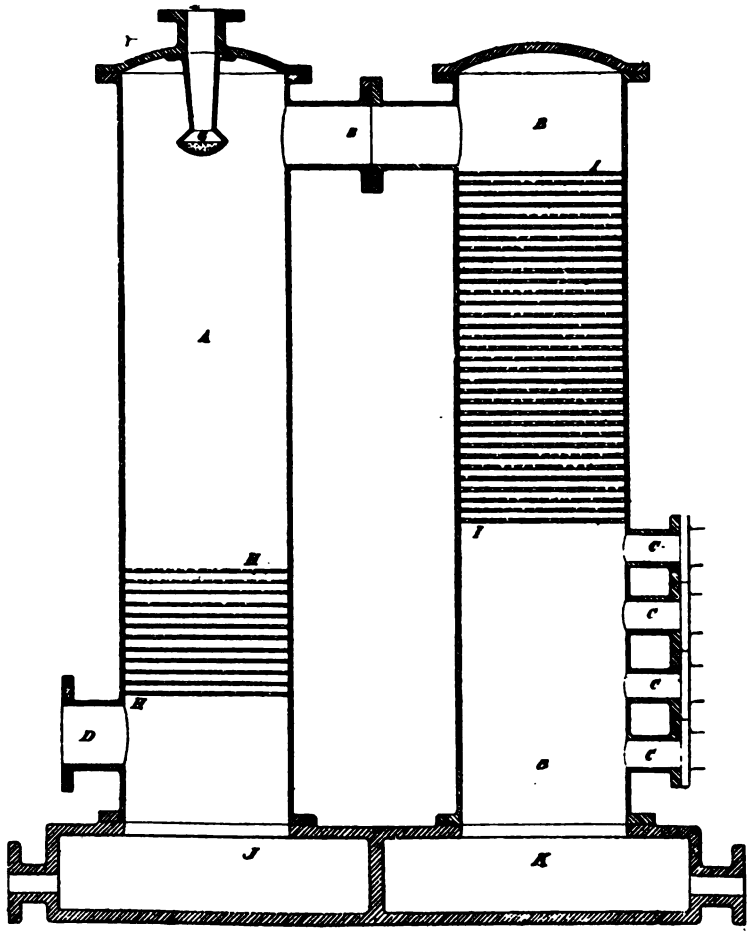
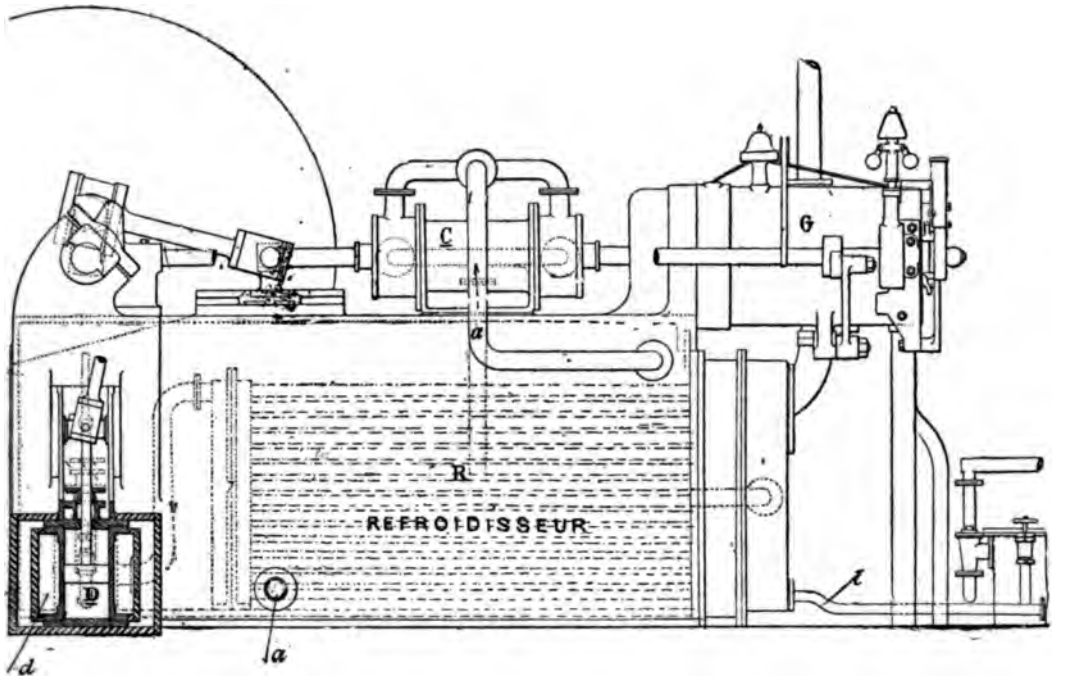


Fig. 31. — Bell-Coleman.
Détail du refroidisseur-sécheur.
A, colonne du refroidisseur remplie de plaques perforées..H, arrosées d'eau en G, et parcourues de bas en haut par l'air comprimé refoulé en D. B colonne sécheuse dont les tôles perforées I sont parcourus de haut en bas par l'air comprimé frais allant, suivant (EBI) au tubes *c* de la chambre froide. JK évacuation de l'eau précipitée en A B et C.

entraînée de A, laquelle s'écoule en K. Au sortir de ce premier sécheur, l'air traverse une série de tubes *ccc*, logés dans la chambre froide M, dont la basse température précipite en K la majeure partie de son humidité, de sorte que l'air arrive de ces tubes à l'aspiration du compresseur, par N, presque sec et



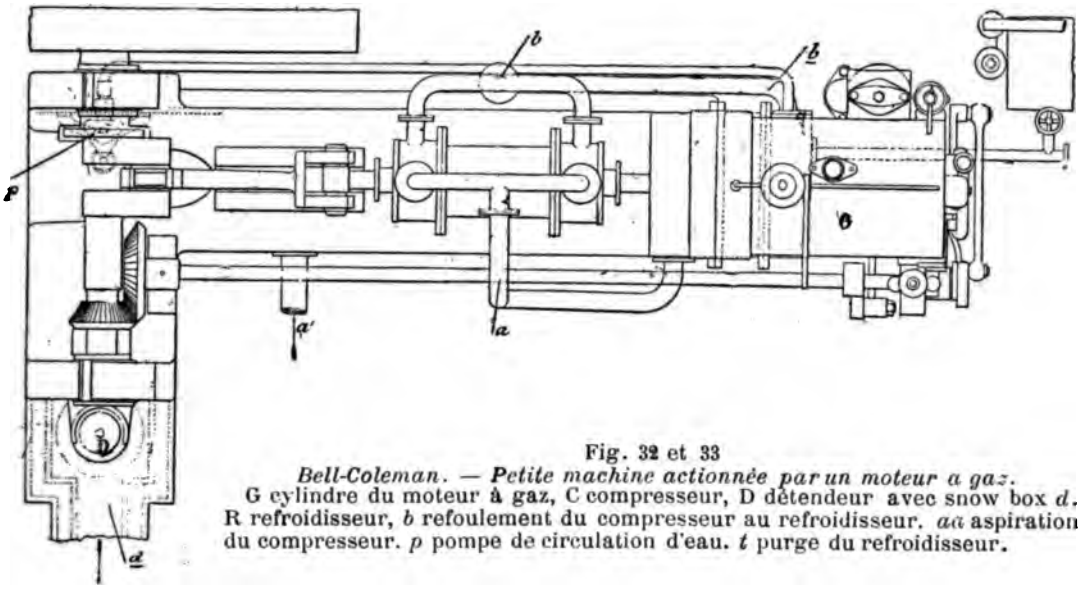


Fig. 32 et 33

Bell-Coleman. — Petite machine actionnée par un moteur a gaz.

G cylindre du moteur à gaz, C compresseur, D détendeur avec snow box *d*, R refroidisseur, *b* refoulement du compresseur au refroidisseur. *aa* aspiration du compresseur. *p* pompe de circulation d'eau. *t* purge du refroidisseur.

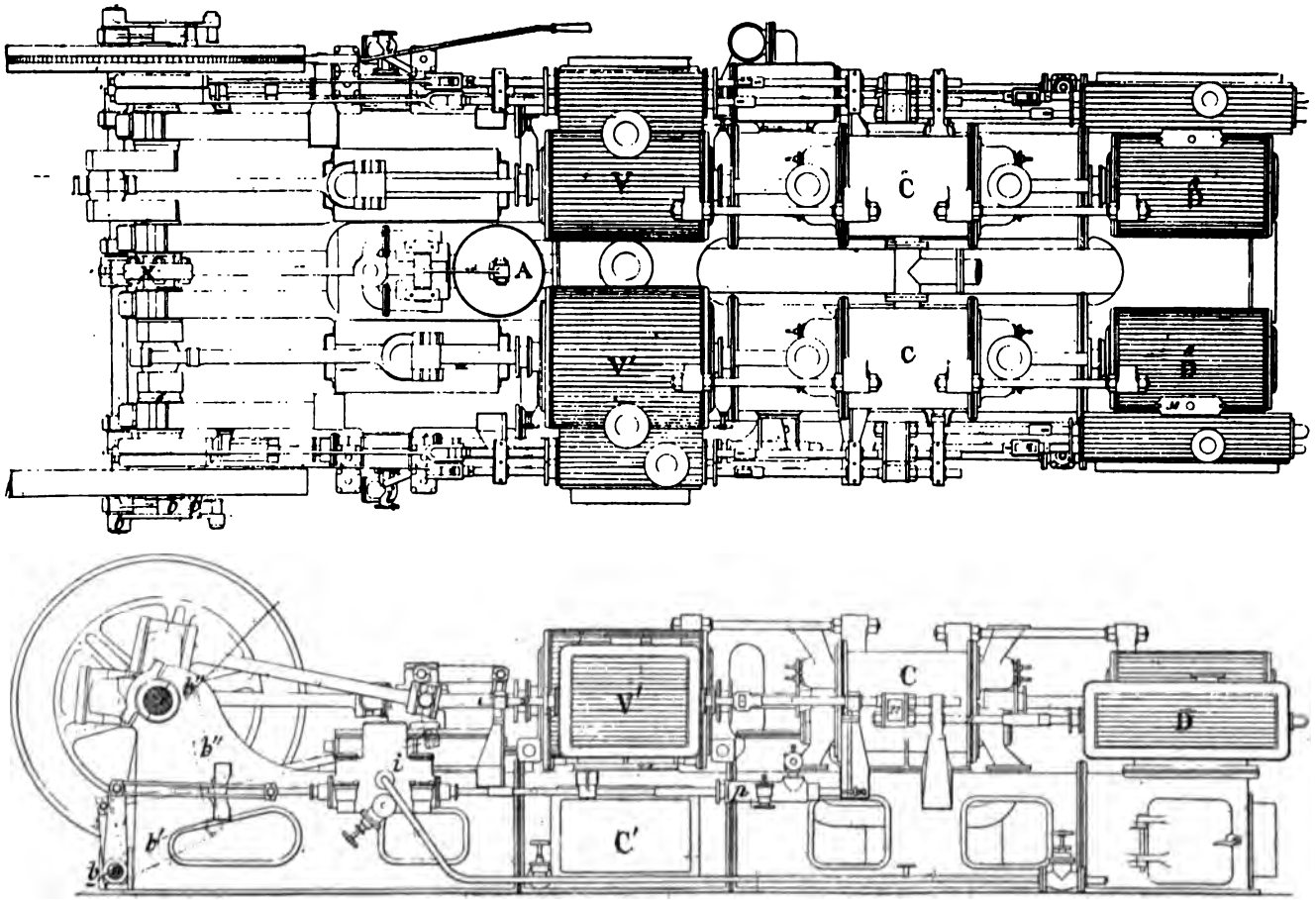


Fig. 34 et 35. — Bell-Coleman. *Machine du type marin de 1883.*
VV', cylindres à vapeur de haute et basse pression. CC compresseurs. DD détendeurs. A pompe à air. *p* pompe de circulation du condenseur à surfaces C'. X accouplement facultatif de l'arbre moteur. *bb'b''* commande de la pompe d'injection d'eau aux compresseurs et au réfrigérant.

froid, à 1° environ. Après sa détente, l'air passe par P à la chambre froide M, d'où il revient indéfiniment à l'aspiration du compresseur.

Dans la petite machine spécialement disposée pour être actionnée directement par un moteur à gaz G (fig. 33 et 34), l'air passe du compresseur C, par *bb*, au compartiment de droite du refroidisseur R, où il est rafraîchi par une injection d'eau, et d'où il traverse, vers le détendeur D, les tubes du réfrigérant. — Du détendeur D, l'air passe, au travers du snow-box *d*, à la chambre froide, d'où il revient au compresseur par *a' a*, en circulant autour des tubes du refroidisseur R. La circulation de l'eau autour du compresseur et du cylindre G du moteur à gaz s'opère à l'aide d'une pompe actionnée par l'excentrique *p*, L'avant du refroidisseur se purge par le tuyau *t*.

Le type de 1883, pour navires, est représenté par les figures 34 et 35. Les cylindres compresseurs C et détendeurs D, à double effet, sont enfilés en tandem à la suite des cylindres à vapeur de haute et de basse pression V et V', qui peuvent fonctionner soit en compound, soit séparément, en découplant en X l'arbre des manivelles. Le condenseur à surface C' a sa pompe à air en A et sa pompe de circulation en *p*. La pompe à air unique A est mue, indépendamment du découplement en X, par l'un ou l'autre des renvois (*b b'b''*).

On voit en *i* les pompes d'injection d'eau aux compresseurs et au réfrigérant non représenté sur les figures. La distribution de l'air se fait aux compresseurs par des soupapes automatiques et aux détendeurs par des tiroirs actionnés par les excentriques mêmes des cylindres moteurs. Ces machines fonctionnent avec une compression de 2 kil. 8, et peuvent refroidir de 80° 2000 mètres d'air par heure. »

MACHINES DE HALL (1)

Les premières machines de Hall n'étaient guère, de l'avis de son ingénieur, M. Lightfoot, que des machines Giffard modifiées : telle est, par exemple, la machine verticale représentée par les figures 36 à 40, destinée à débiter, à 60 tours, 420 mètres cubes d'air froid par heure. L'air aspiré au cylindre compresseur à enveloppe d'eau C par le tuyau A est refoulé par B au refroisseur D, qui renferme 170 tubes de laiton horizontaux, de 13 millimètres de diamètre et de $1^{m},35$ de long, disposés en cinq faisceaux parcourus du haut en bas par une circulation d'eau froide. Ainsi que l'indique la figure 38, l'air comprimé traverse le refroidisseur en sens contraire de la circulation de l'eau, c'est-à-dire de bas en haut, en rencontrant de l'eau de plus en plus froide. Au sortir du refroidis-

1. *Inst. of Mechanical Eng.*, janv. 1881 et *Revue industrielle*, 15 janvier 1884, « *On machines for producing cold air* » par T.-B. Lightfoot. *The Engineer*, 1er octobre 1880, 14 avril 1882. *Engineering*, 29 septembre 1882,

seur D, l'air, abaissé à une température inférieure de 5 à 6° seulement à celle de l'eau de circulation, se rend dans le réservoir G, où il dépose une partie de son humidité, qui s'en évacue par le bas au moyen de robinets de purge. L'air comprimé, refroidi et en partie desséché, est amené par le tuyau I au détendeur E, où il s'abaisse à la pression atmosphérique, et d'où il s'échappe par le tuyau J.

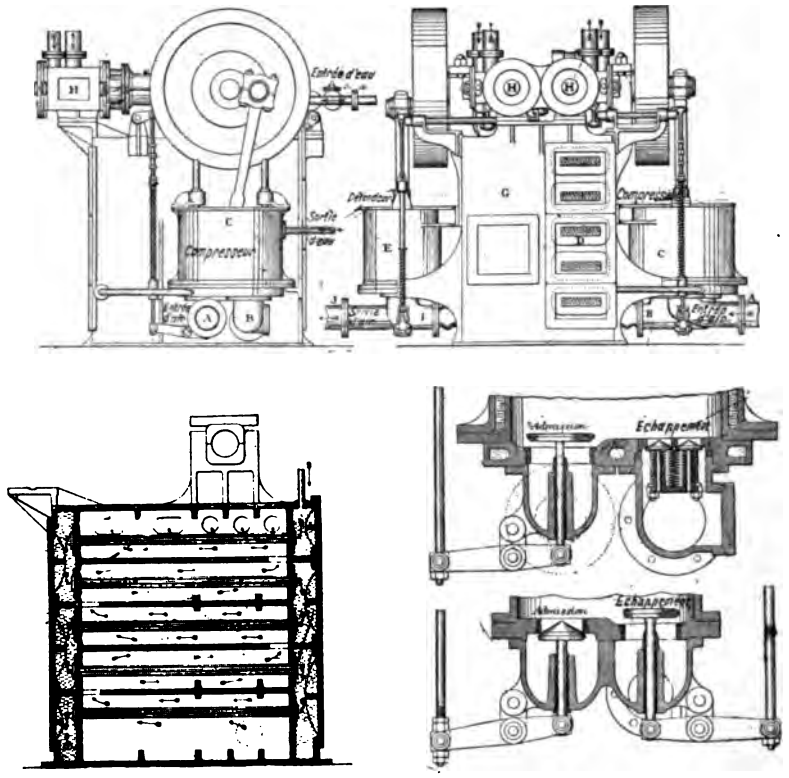


Fig. 36 à 40

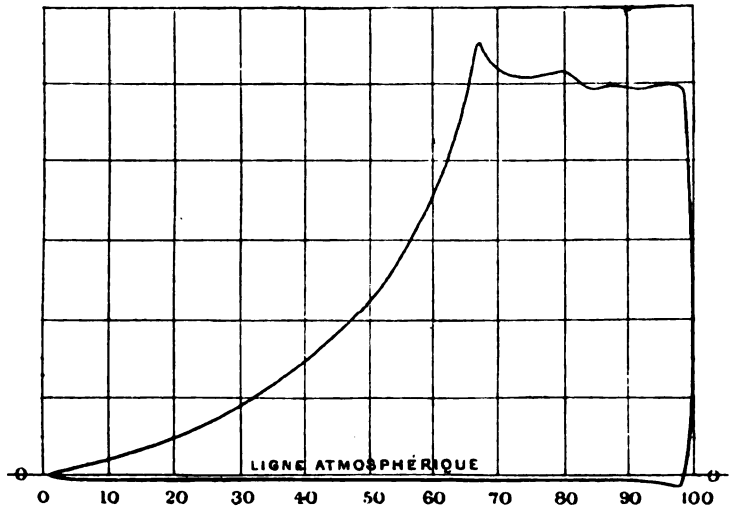
Hall. *Machine verticale. Ensemble; détails du refroidisseur et des soupapes du compresseur et du détendeur.*

C, compresseur à enveloppe d'eau.
E, Détendeur.
G, Refroidisseur.
HH, Cylindres du moteur à vapeur.

Les soupapes d'admission et d'échappement du détenteur (fig. 40) sont desmodromiques : au compresseur, la soupape d'aspiration est seule conduite mécaniquement (fig. 40), tandis que les soupapes de refoulement, au nombre de six, fonctionnent automatiquement. Les cylindres du moteur à vapeur H. H. n'ont à vaincre que les résistances passives de la machine et la différence entre les travaux de compression et de détente de l'air.

Les diagrammes moyens relevés sur le compresseur et le détendeur de cette machine sont représentés par les figures 41 et 42.

Les principales caractéristiques de cette machine sont les suivantes :



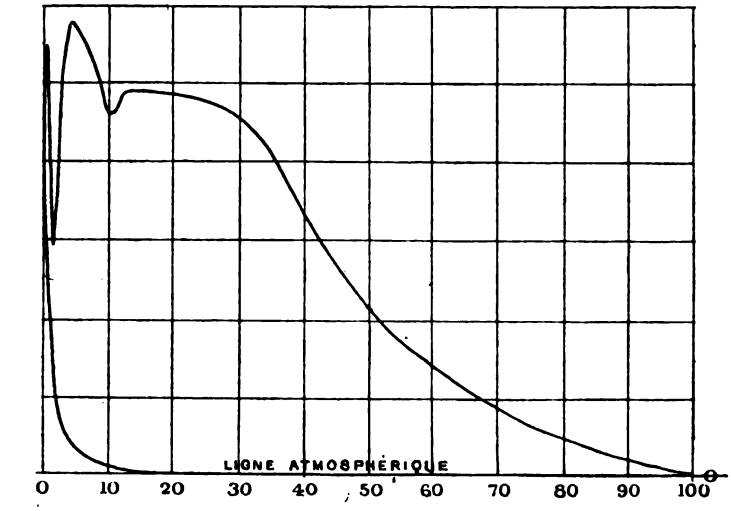


Fig. 41 et 42. — *Hall. Machine des fig.* 36 *à* 40. — Diagrammes du compresseur et du détendeur à l'échelle 0 k. 5 par division.

Diamètre du cylindre compresseur.	D = 685mm
— cylindre détendeur.	*d* = 560
Course du piston	460
Tours par minute	62
Pression dans le réservoir G.	4k,35
Température de l'air aspiré	11°
— comprimé	113°
— en G	21°
— détendu	— 63°

Travail de compression	43 chev. 10
— détente	28 » 60
Différence travail moteur	14 » 50
Cylindres moteurs, diamètre	305mm
— course	250
Travail moteur indiqué	24.6
Pression d'admission de la vapeur	4 kil.
Température de l'eau de circulation initiale	14°
— — finale	63°
Dépense d'eau de circulation par minute	4 kil. 20
Travail perdu par le refroidissement de l'air	19 chev.
Rapport	$\frac{D^2}{d^2} = 1.50$
Rendement organique	0.58

Le refroidisseur D. D. de la petite machine représentée par la figure 43 ne comprend que deux faisceaux de tubes : l'air comprimé, refoulé par B autour de la première série de ces tubes, passe à la seconde par dessus le diaphragme L, puis au détendeur. Le cylindre moteur unique H est placé verticalement entre le détendeur et le compresseur.

Les deux machines que nous venons de décrire ne produisent pas d'air froid sec. Pour obtenir de l'air sec, on se sert, comme nous l'avons vu page 14, de la détente même de l'air, qui se fait alors en deux temps. L'air comprimé, humide et refroidi, est détendu d'abord dans un premier cylindre ou détendeur intermédiaire, d'où il passe au détendeur final, après avoir déposé presque toute son humidité dans un sécheur à chicanes interposé entre les deux détendeurs. — Prenons comme exemple de l'air à 35°, comprimé à 4k,50 absolus, et pleinement

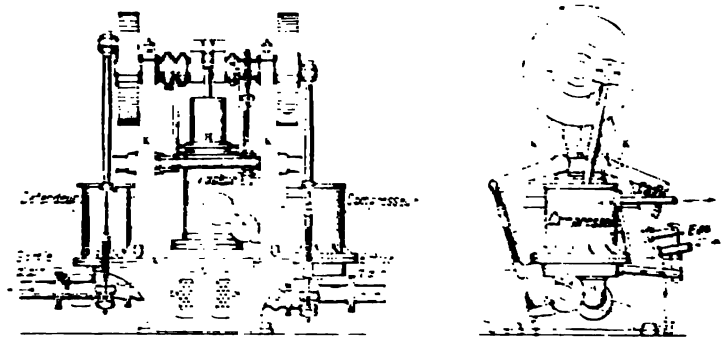


Fig. 43. — *Hélil. — Machine verticale à jet tangent.*
B, refoulement de l'air comprimé au refroidisseur DL. H cylindre moteur à vapeur. K bâtis supportant l'arbre moteur.

saturé de vapeur d'eau, c'est-à-dire renfermant en suspension 0,008 de son poids de vapeur d'eau. Après une détente de 1,75, cet air, refroidi à 1° et ramené à une pression de 2k,45, ne renfermera plus que 0,0016 d'eau au sortir du premier détendeur et du sécheur. Cet air, admis ensuite au second détendeur, s'y détendra suivant une adiabatique, ou à très peu près, et ne renfermera plus, à la fin

de sa détente, que 0,001 d'eau; l'humidité précipitée au détendeur (0,0006 est recueillie en givre dans la boîte à neige. L'air s'échappe donc du second condenseur avec très peu de vapeur en suspension.

Le diagramme, fig. 44 permet de comparer les deux modes de dessèchement de l'air : par une détente intermédiaire, comme dans les machines de Hall, et par le refroidissement complémentaire de l'air comprimé au moyen de l'air détendu, comme dans les machines de Bell-Coleman. Au sortir du premier refroidisseur ou du réservoir C, (fig. 11, p. 13), l'air comprimé à 4 kil. 50 et à la température de 35° occupe un volume CD: après son refroidissement à 5° sous pression constante, son volume a diminué de DE. Pendant ce refroidissement par l'échange de température avec de l'air froid extérieur au travers des tubes d'un condenseur à air, cet air froid a abandonné une quantité de chaleur suffisante pour élever de 46° une même masse d'air sec : on voit que la courbe réelle de détente (EG) ne s'écarte que très peu de la courbe de détente adiabatique (EF) de l'air supposé sec en E, car l'air ne renferme que très peu d'humidité en E à la température de 5°.

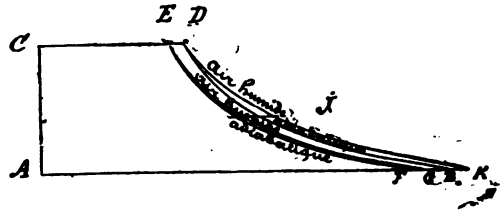


Fig. 44.

Avec le système de Hall, l'air se détend d'abord, dans le premier détendeur, suivant DJ, jusqu'à la pression de 2 kil. 40, et la température s'abaisse de 35° en précipitant la même proportion d'humidité que dans le premier cas, par le refroidissement à 5° sous pression constante.

Dans le second détendeur, cet air presque sec, se détend suivant JR jusqu'à la pression atmosphérique et une température de —55°, tandis que l'adiabatique DB de l'air sec conjuguée, à DK, aboutirait à une température finale de —70°. La température finale est donc moindre, à détente égale, avec le système de Hall —55° au lieu de —85° ; mais à la fin de la détente seulement, aussitôt au sortir du détendeur. En effet, dans l'autre système, l'air détendu s'échauffe en refroidissant l'air comprimé pour en précipiter l'humidité, tandis, qu'avec le procédé Hall, l'air qui s'échappe du second détendeur est entièrement utilisé pour l'application immédiate de son froid.

En outre, le travail restitué par la détente est, avec le procédé Hall, plus grand dans le rapport des deux surfaces ACDK. ACEG.

D'après M. Lightfoot, les quantités de vapeur d'eau précipitées aux différentes phases du refroidissement, dans une machine de Hall capable de refroidir par heure 420 mètres cubes d'air pris à 32° seraient données par le tableau ci-dessous.

	kil.	0/0
Vapeur contenue dans l'air à 320°	20.50	100
Déposée dans le refroidisseur G	15	74.10
Après la première détente	4.20	20.40
En givre, dans l'air refroidi	0.40	2.05
Total.....	19.60	
Restant dans l'air froid.....	0.90	3.45

Les figures 45 et 46 représentent une machine de Hall à cylindres moteurs inclinés pourvu d'un sécheur Lightfoot. L'air comprimé, refoulé par A au refroidisseur qu'il traverse en rencontrant de l'eau de plus en plus froide, passe par C au haut du cylindre de détente, dans l'espace annulaire duquel il subit sa première détente. De cet espace, l'air refroidi à 1° environ passe par par D, au travers du sécheur à chicanes E, dans le réservoir K, où il

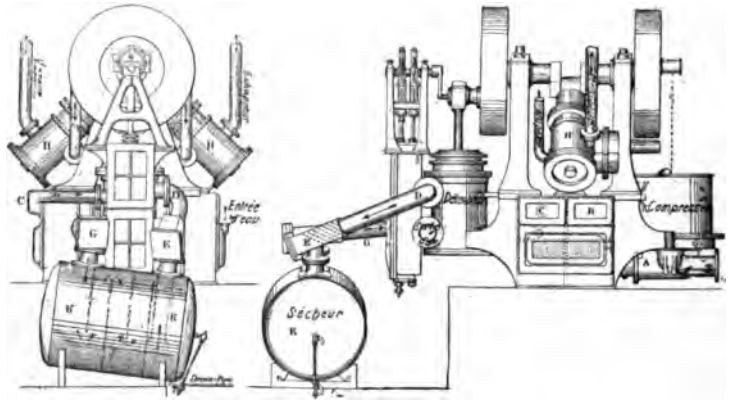


Fig. 45 et 46. — *Hall. Machines a cylindres inclinés*
HH, cylindres moteurs. A refoulement du compresseur au refroidisseur BC puis dans l'espace annulaire du détendeur. E boite à chicanes ou l'air dépose, après la première détente, la majorité de son eau, qui s'écoule en K. G conduite amenant l'air sec au bas du détendeur, où il subit sa grande détente.

dépose presque toute son humidité, et qui l'envoie, par le tuyau G, au bas du cylindre détendeur, où il achève de se détendre et de se refroidir. Dans cette machine, le compresseur est refroidi par une circulation d'eau séparée au lieu de l'être, comme dans les appareils précédents, par de l'eau qui a déjà refroidi le rafraîchisseur B ; il en résulte que la température de l'air aux compresseurs est plus basse : 110° au lieu de 130°. Cet air arrive au premier détendeur à une température de 35°, et très humide ; il sort de la machine parfaitement sec.

Les figures 47 représentent deux séries diagrammes de cette machine pris à 60 tours sur le compresseur et les deux détendeurs.

Pour la marine, on préfère, en général, les machines horizontales. Les figures

11 à 13, page 15 représentent un type de machine Hall de ce genre, à sécheur détendeur, pouvant débiter à 65 tours 140 mètres cubes d'air par heure. Le compresseur a double effet est pourvu d'un cylindre en bronze, plus mince et plus conducteur que la fonte, afin d'en faciliter le refroidissement.

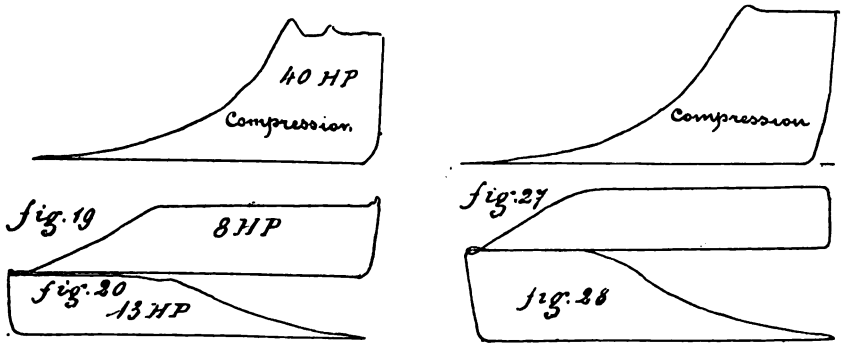


Fig. 47. Diagrammes du compresseur et des deux détenteurs. Machines Hall (fig. 45 et 46).

L'air, comprimé à 4 kil. 50 s'échappe dans les refroidisseurs BB, d'où il passe, à l'avant du détendeur E, dans l'espace annulaire A, puis au sécheur à chicanes D, représenté en détail par la figure 12, et dont la disposition des toiles C est due à M. Cowper. Du sécheur, l'air passe à l'arrière du détendeur, où il achève sa détente et son refroidissement.

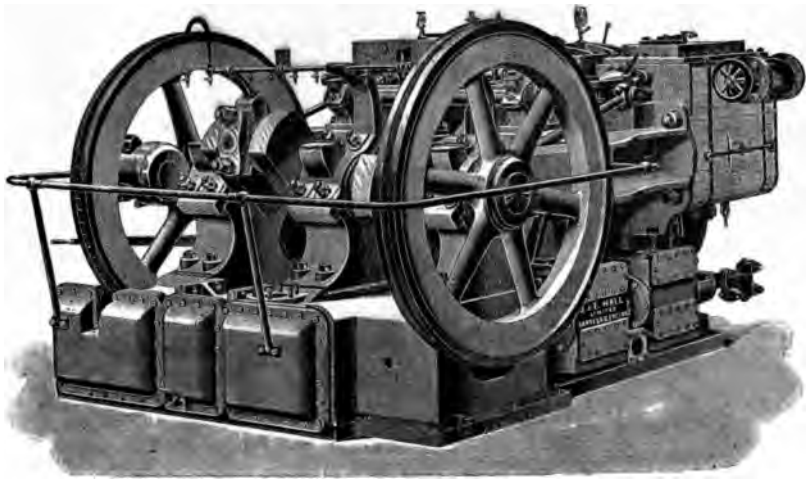


Fig. 48. — *Hall.* Machine de 2000 m³ à l'heure

Dans quelques types de machines plus puissantes, le compresseur et le cylindre à vapeur sont placés dans le prolongement l'un de l'autre, au dessus de l'arbre du

volant commandé par un renvoi à balancier. Le piston du cylindre détendeur placé en contre-bas et dans le plan de l'arbre du volant, est commandé par une manivelle en arrière de 75° sur la manivelle motrice. Le balancier qui renvoie le mouvement à la manivelle motrice actionne aussi la pompe à air du condenseur à injection logé dans le bâtis. L'admission au détenteur s'opère, comme pour les machines précédentes, au moyen de tiroirs Meyer réglables à volonté : les soupapes d'échappement sont desmodromiques. Des machines de ce type, occupant $6^m,40$ de long, sur $2^m,45$ de haut et autant de large fonctionnent à l'établissement frigorifique des Docks de Sainte Catherine à Londres, où elles débitent 300 mètres d'air par heure.

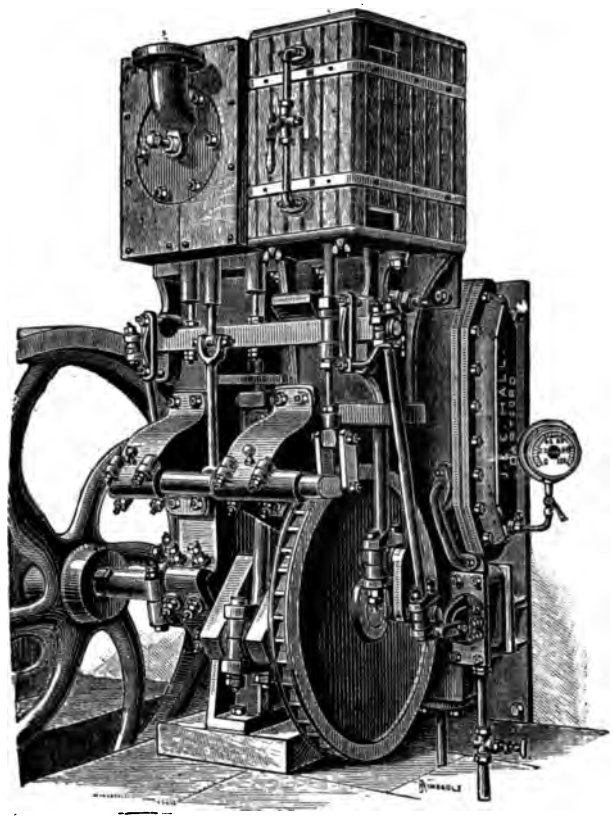


Fig. 49. — *Hall.* Machine de 50 m³

L'une des machines les plus puissantes construites par M. Hall (fig. 48), débite jusqu'à 2000 mètres cubes d'air froid par heure, sous un encombrement relativement faible de $4^m,20 \times 2^m,70 \times 2^m$ de hauteur. Elles sont appliquées

sur plusieurs navires pour le transport des viandes, notamment par la *Colonial Union Line*, pour la Nouvelle-Zélande.

La machine type n° 11, la plus puissante construite jusqu'à présent par M. Hall, débite, avec une puissance de 240 chevaux, 4000 mètres d'air par heure. Son encombrement est de $5^m,800 \times 3^m \times 1^m,85$. Elle est aussi du type horizontal double, avec machine à vapeur compound.

Nous citerons, à côté de ces grandes machines, les petits appareils établis par M. Hall pour les installations domestiques ou industrielles de peu d'importance comme les machines du type A, qui peuvent être disposées à volonté horizontalement ou verticalement, et la machine verticale représentée par la figure 49, qui débite par heure 53^{m3} d'air à — 40°, avec une puissance motrice de 4 chevaux, un moteur à gaz par exemple.

MACHINES LIGHTFOOT

M. Lightfoot, autrefois attaché à l'usine de M. Hall, inventeur du procédé de séchage de l'air par détente intermédiaire adopté par ce constructeur (1) a construit depuis, pour son compte, un certain nombre d'appareils frigorifiques à air, dont nous allons présenter une description sommaire d'après un mémoire que Lightfoot a présenté en mai 1886 à l'institution des Mechanical Engineers de Londres (2).

La machine représentée par les figures 50 à 52 peut débiter, suivant sa vitesse, de 600 à 1700 mètres cubes d'air par heure. Le compresseur C est à double effet, et le détendeur E à simple effet, avec robinets distributeurs en bronze phosphoreux qui marchent sans bruit avec de très faibles espaces nuisibles. Ces robinets fonctionnent d'après M. Lightfoot, très bien et avec fort peu d'usure. On peut facilement accéder au piston du détendeur dont la partie la plus froide est, comme on le voit, très éloignée du compresseur toujours un peu chaud.

L'air, admis au compresseur par les robinets AA, est refoulé par le tuyau B au refroidisseur R, dont les tubes, en métal Muntz et de 20 millimètres de diamètre, sont parcourus par un courant d'eau que la pompe P refoule par D au refroidisseur, puis, par F et H, autour du compresseur. L'humidité de l'air précipité dans le refroidisseur se purge à la main ou automatiquement ; l'air, qui y circule en sens contraire du courant d'eau, s'en échappe à une température ne dépassant que de 2° à 3° celle de l'eau. — Il faut environ 4 1/2 à 6 litres

1. Brevet anglais 4065 de 1880.
2. *On refrigerating and ice making machinery* et brevet anglais 678 de 1882.

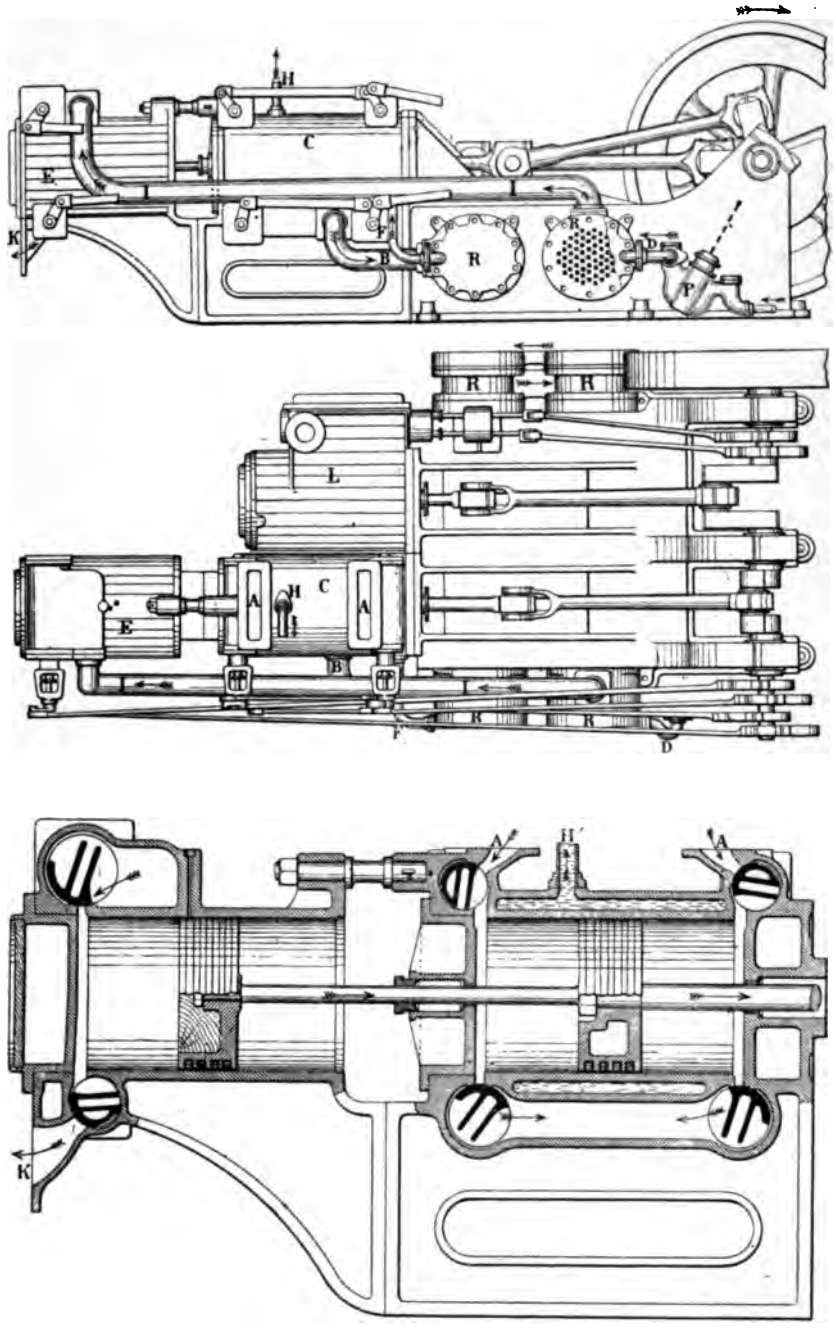


Fig. 50, 51 et 52. — *Lightfoot. Machine de 600 à 1700 m³*
Elévation, plans, détails du compresseur et du détendeur
L cylindre à vapeur. E compresseur. E détendeur.
B tuyau amenant l'air comprimé au détendeur par les refroidisseurs RR et le tuyau I. P pompe de circulation d'eau aux refroidisseurs puis au compresseur suivant H E. A admission au compresseur.

d'eau par mètre cube passé dans la machine, c'est-à-dire, trois ou quatre fois le poids de l'air. — Du refroidisseur, l'air passe, par I, au détenteur E, d'où

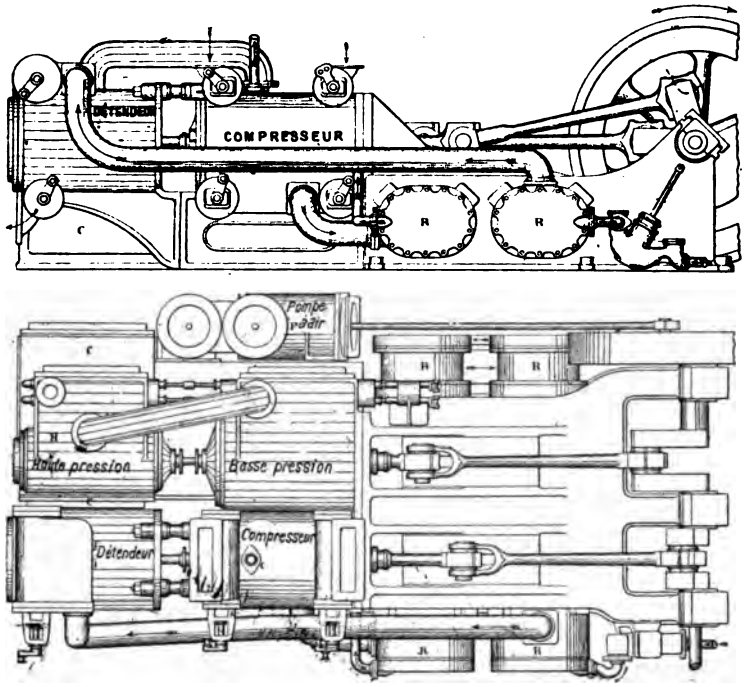


Fig. 53 et 54. — *Lightfoot*. Machine horizontale à moteur compound RR refroidisseur, C condenseur à surfaces.

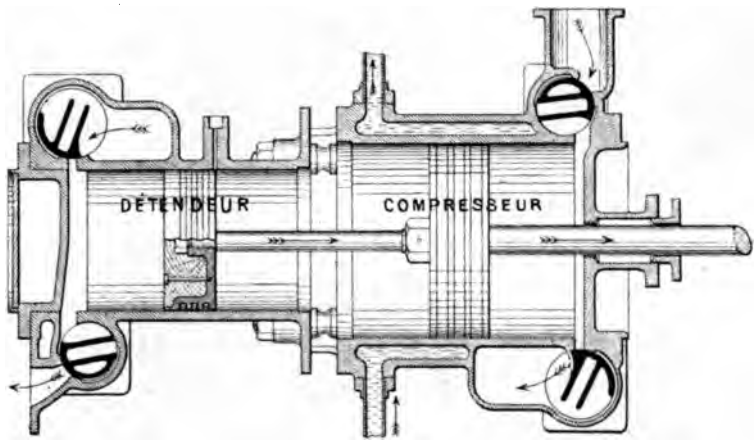


Fig. 55. — Détail du compresseur et du détendeur des machines de 600 m³

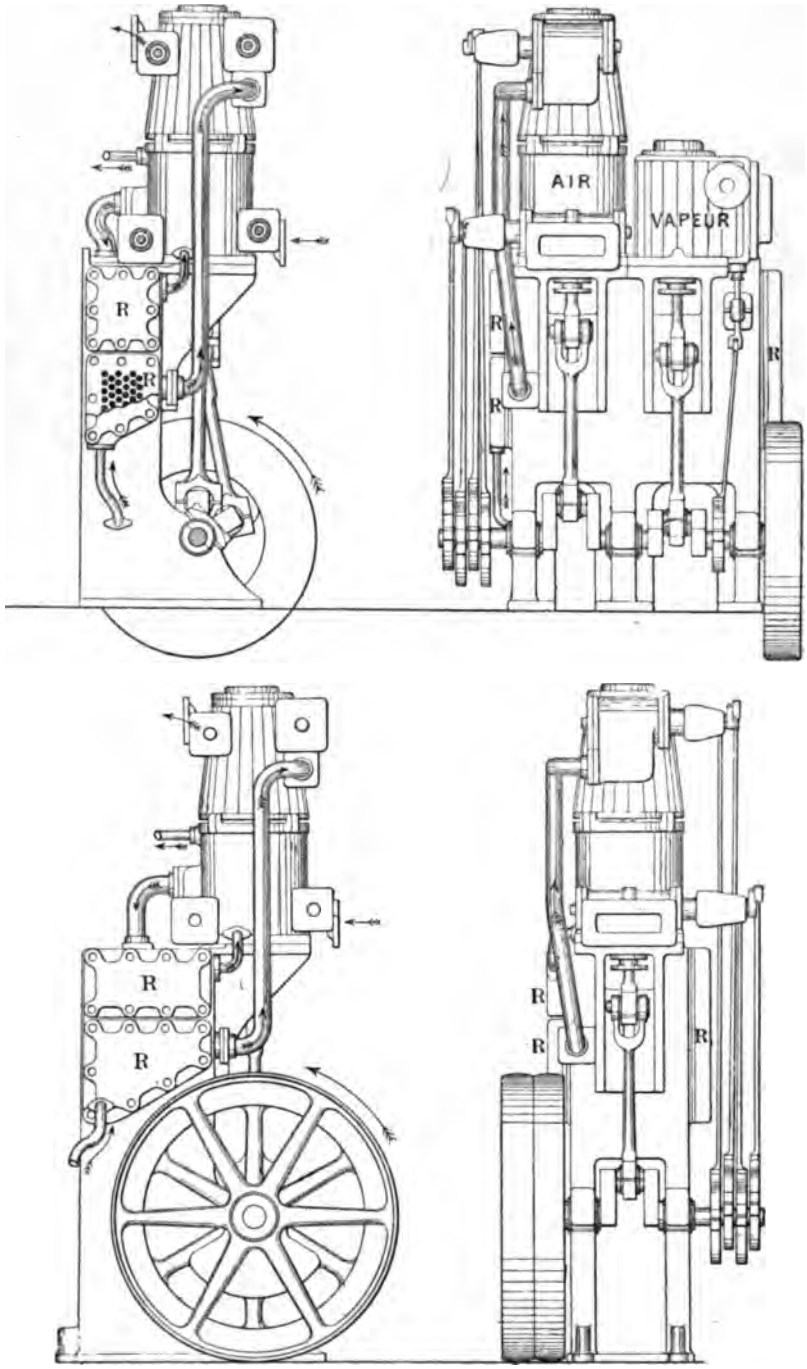


Fig. 56 à 59. — *Lightfoot.* Machines verticales avec et sans moteur à vapeur conjugué.

il s'échappe par K. à — 60 ou — 70°, après avoir restitué par sa détente environ 60 0/0 du travail de compression.

On peut facilement, sans augmenter l'encombrement de la machine, ajouter au cylindre à vapeur un condenseur d'injection ou à surfaces et sa pompe à air, ou un cylindre de détente pour marcher en compound. — Dans ce cas, (fig. 53 et 54 le condenseur à surface C est placé sous le cylindre de haute pression H, et la pompe à air latéralement en P. La même eau sert pour le condenseur et pour le refroidisseur R, qu'elle traverse avant d'arriver au condenseur.

Pour les machines de terre débitant plus de 1700 mètres cubes à l'heure, M. Lightfoot préfère la disposition verticale avec compresseur et détendeur à simple effets commandés par une machine horizontale compound. La plus puissante machine qu'il ait construite sur ce modèle débite 8000 mètres cubes à l'heure. Le compresseur est rafraîchi par une injection d'eau intérieure, qui s'écoule constamment sur la face active du piston et sur les parois du cylindre sans se disperser dans l'air comprimé.

Au-dessous d'un débit de 600 mètres, à air, M. Lightfoot préfère employer aussi des compresseurs et des détendeurs à simple effet conjugués comme l'indique la figure 55, ce qui permet de simplifier et de réduire encore l'encombrement de la machine.

Les types verticaux représentés par les figures 56 à 59, également de faible force, ont leurs refroidisseurs R venus de fonte avec le bâtis.

D'après M. Lightfoot, il faudrait, pour abaisser de + 12° à — 60° avec de l'eau à 12°, une tonne d'air par heure, dépenser environ 18 chevaux indiqués au cylindre moteur des grandes machines.

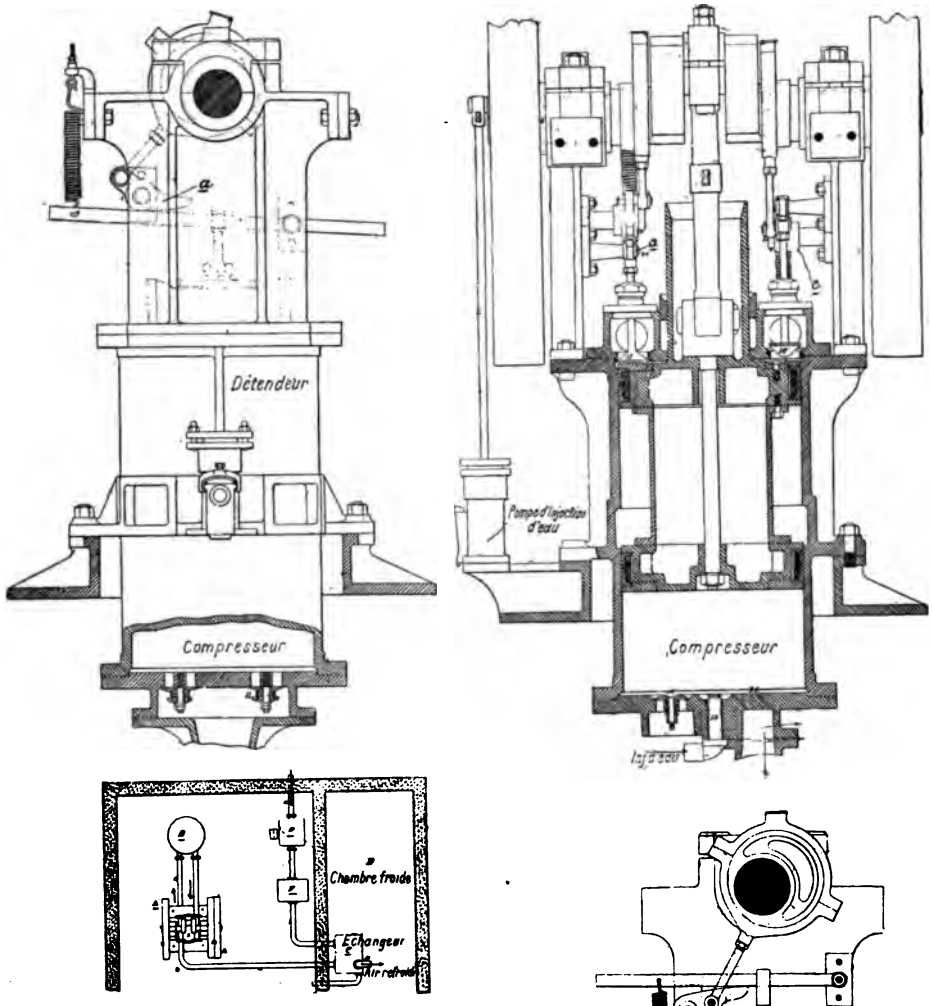
MACHINES DE HARGREAVES ET INGLIS (1)

Les machines de MM. Hargreaves et Inglis, construites par la maison Hick Hargreaves and C°, de Boulton, se distinguent par quelques particularités intéressantes.

Les figures 61 et 62 représentent les principales particularités des machines verticales très compactes, à cylindres compresseur et détenteur superposés. Au compresseur, l'air est refroidi par une injonction d'eau. Les soupapes d'amission et d'échappement du détendeur sont commandées mécaniquement par des cames *a* et *e*, qui donnent sans chocs des ouvertures et des fermetures très rapides. Les espaces nuisibles sont très réduits. L'air comprimé passe du com-

1. Brevets anglais 3340 de 1877, 1747 de 1878. *Engineering*, 4 août 1884.

presseur au réservoir B (fig. 64), puis au détenteur et au réfrigérant *c*, ou frigorifère, d'où il revient au compresseur. L'air à refroidir, aspiré par un ventilateur E, est refoulé, dans la chambre froide D, autour des tubes du frigorifère *c*, après avoir été filtré et purifié en E.



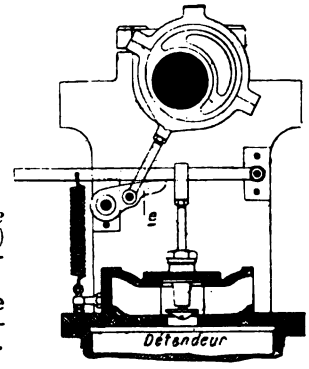
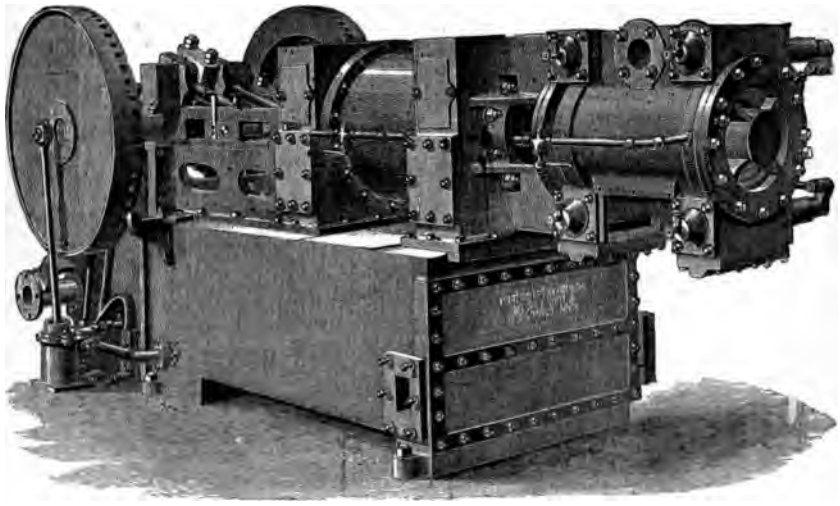


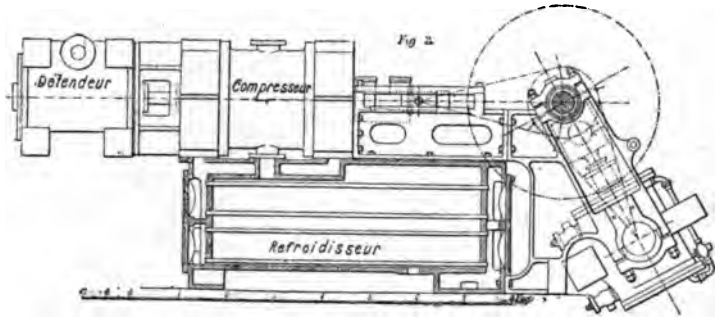
Fig. 60 et 61. — *Hargreaves et Inglis. Machine verticale.* Ensemble de la machine et détail (fig. 62) de la commande de la soupape d'aspiration du détendeur par la came *e*.

Fig. 63. — Ensemble d'une installation : A machine frigorifique. B réservoir d'air comprimé. C frigorifère. D chambre à refroidir. E ventilateur. F filtre d'air.

Le compresseur des machines horizontales est à double effet. — Dans le type représenté par les figures 64 à 68, l'air comprimé se rafraîchit dans les

tubes d'un refroidisseur R qu'il traverse de haut en bas avant d'arriver au détendeur faisant suite au compresseur sur le même bâti. Le détendeur a sa distribution faite par quatre robinets Corliss : deux pour l'admission et deux





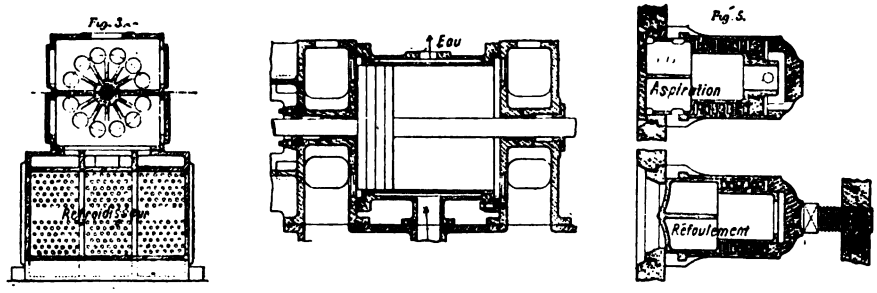


Fig. 64 à 68. — *Hick. Hargreaves.* Ensemble d'une machine horizontale: Coupe transversale par le compresseur, détail du compresseur et de ses soupapes d'aspiration et de refoulement.

pour l'échappement, au-dessous des cylindres, très accessibles et à l'abri des engorgements par la neige. Les robinets d'échappement sont seuls pourvus de déclics : ceux de l'admission sont mûs par un excentrique sans déclanchement. Le compresseur est pourvu de soupapes d'aspiration et de refoulement automatiques, à ressort réglables à volonté, et très accessibles (fig. 68).

Le cylindre de la machine à vapeur, oscillante et bien isolée du détendeur, est monté à part à l'autre extrémité du bâtis.

Les principales caractéristiques de cette machine sont les suivantes :

Cylindres compresseur. .	diamètre :	530	millimètres.
— détendeur	—	400	—
— moteur	—	457	—
— —	course :	457	—
Refroidisseur..	Nombre des tubes.	234	
—	Diamètre des tubes :	25	—

Vitesse 120 tours par minute.

En marche normale, la pression moyenne de l'air est de 2 kil. 80 au compresseur et de 1 kil. 50 au détendeur.

Deux machines de ce modèle fonctionnent pour la conservation des viandes transportées de la Nouvelle-Zélande à bord du Marsala.

MACHINES DE HASLAM (1)

Les machines frigorifiques fabriquées à Derby par M. Haslam, qui est aussi le constructeur des appareils Bell-Coleman, sont très répandues en Angleterre.

Les soupapes d'aspiration B (fig. 6 et 7, p. 11) et de refoulement C, du compresseur, ont leurs sièges ajustés dans un plateau en bronze A, rafraîchi par une circulation d'eau *a*. Le fond du compresseur est divisé par une cloison *c* en deux compartiments renfermant l'un deux soupapes d'aspiration, et l'autre trois soupapes de refoulement. — Les guides des soupapes de refoulement sont simplement vissés dans leurs sièges, de sorte qu'il suffit d'enlever le regard D' du plateau extérieur pour accéder aux soupapes et les démonter très facilement ; il en est de même pour les soupapes d'aspiration, suspendues à leurs tiges par un joint sphérique, qui assure la liberté du guidage et empêche tout broutement du guide par défaut de coïncidence entre son axe et celui de la tige.

Dans la machine représentée par les figures 69 et 70 les cylindres compresseur et détendeur sont disposés en C et en D, latéralement aux cylindres de haute et de basse pression A et A' du moteur compound, dont le condenseur G fait partie du bâtis général. — On voit en H la pompe de ce condenseur, en I

1. Brevets anglais 1484, 5060 de 1880; 2032 de 1883. *The Engineer*, 9 sept. 1887, p. 219.

les pompes alimentaires, en MM les pompes de circulation du refroidisseur et du compresseur.

Le refroidisseur est divisé en deux parties E et F : la première partie est refroidie par une circulation d'eau et la seconde par l'air froid même sortant du détendeur ou de la chambre froide. L'air comprimé et chaud arrive du

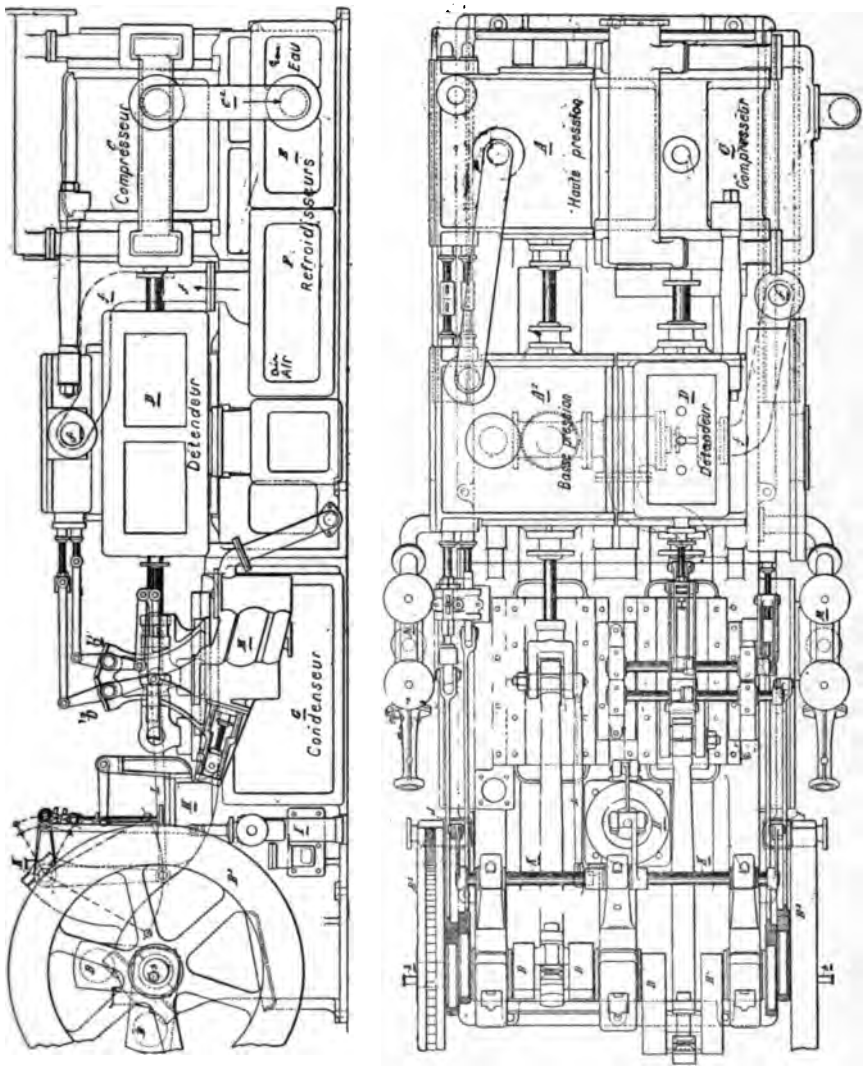


Fig. 69 et 70. — *Haslam. Machine horizontale à moteur compound*
H pompe à air, II pompe alimentaire, MM pompes de circulation.

compresseur au premier refroidisseur par C', passe successivement autour des tubes des deux refroidisseurs, et sort de *f* par *f'* au détendeur, où il arrive déjà refroidi et débarrassé de presque toute son humidité.

La commande de pompes H et I se fait par le renvoi de mouvement K, et celle des pompes de circulation M par les boutons *b*. — Les soupapes du compresseur sont automatiques; le détendeur est desservi par des tiroirs représentés en détails sur la figure 71, et commandés par excentrique et balancier *b'*. L'air comprimé admis aux chambres A et B passe, à chaque extrémité du détendeur, par les tiroirs de détente C et D, d'admission et d'échappement E F. Ces derniers tiroirs, équilibrés par des couronnes à ressorts (E_1 E_2) (F_1 F^2) admettent l'air comprimé par G et H, puis laissent l'air détendu s'échapper par ces mêmes lumières en J, dans la boîte à neige, à laquelle on arrive facilement par le couvercle J_2.

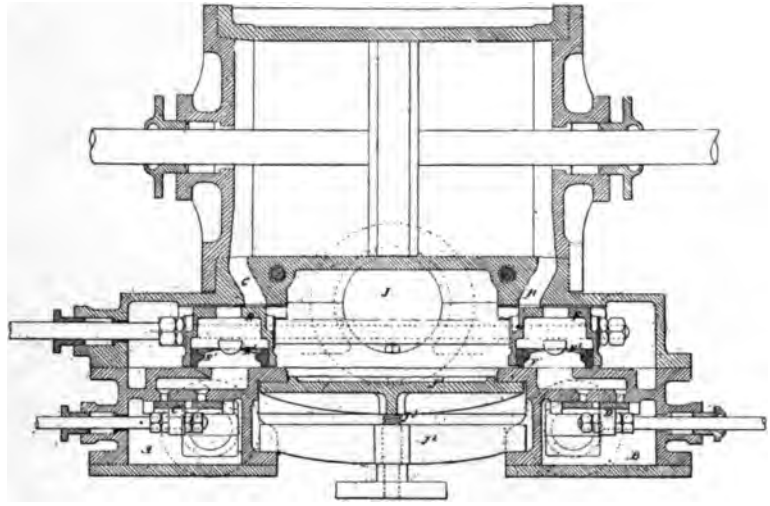


Fig. 71. — *Haslam. Détail du détendeur.*

AB chambres des tiroirs de détente C et D. EFGH tiroirs et lumières d'admission et d'échappement. E' F' plaques d'équilibre des tiroirs E et F, à ressorts E^2 F_2. J tuyau d'échappement. J' regard serré par la vis J^3 et l'étrier J^4.

Les figures 72 et 73 représentent une autre disposition adoptée par M. Haslam pour refroidir l'air aux sortir du compresseur par l'air du détendeur ou par un retour de la chambre froide.

Dans les deux cas, l'air comprimé et chaud est refoulé par A_2B au travers d'une série de tubes B_2, enfermés dans un compartiment E, et se rend par B_4 au détendeur, dont il sort très froid par D.

Dans le premier cas, l'air même du détendeur passe de la vanne K au conduit en bois 9, qui l'amène au bas du compartiment E, d'où il se rend à la chambre froide par (*j* I D_1) après avoir refroidi l'air comprimé dans les tubes B_2.

Dans le second cas, on ferme les vannes K et J et l'on ouvre les vannes M et N. L'air qui revient de la chambre froide par L passe alors à l'aspira-

tion P du compresseur, non plus directement, mais par le trajet (L_1 E N L_2) en passant autour des tubes B_2.

Lorsque les tubes B_2 s'engorgent par le dépôt de givre et de glace que l'air y dépose en se refroidissant, on n'a qu'à fermer toutes les vannes (I *j* M N) : la

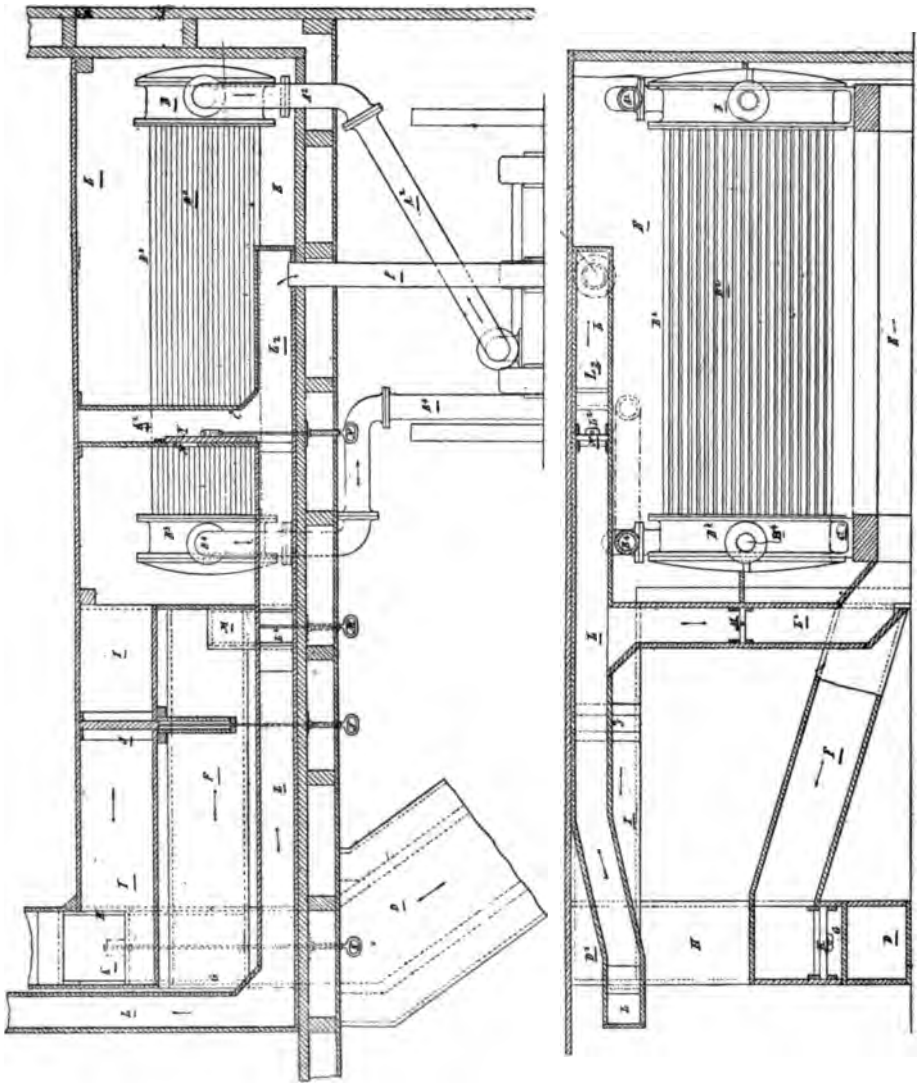


Fig. 72 et 73. — *Refroidisseur Haslam. Élévation et plans-coupes.*
B_2, tubes traversés par l'air comprimé chaud amené du compresseur par A_2B et allant par B_1 à l'aspiration du détendeur. D, échappement du détendeur. K, vanne permettant d'envoyer l'air froid au détendeur, par F_1, en E, autour des tubes B_2, d'où il passe par IJD_1 à la chambre froide.
MN, vannes permettant de dévier l'air revenant de la chambre froide à l'aspiration P du compresseur autour des tubes B, par le trajet (L_1E NL_2).

chaleur de l'air comprimé dégivre très rapidement les tubes, dont l'eau de fusion s'évacue par *c*.

La machine de Haslam representée par les figures 74 et 75 est double avec deux cylindres à vapeur, deux compresseurs C, deux détendeurs à double effet E. — En temps ordinaire, les cylindres à vapeur marchent en compound ; en cas

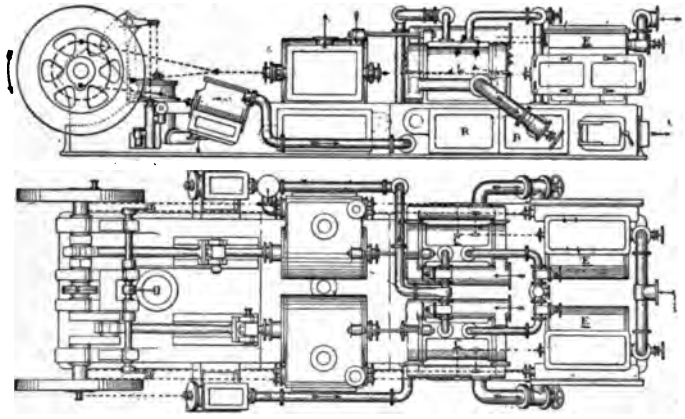


Fig. 74 et 75. — *Haslam. Machine double horizontale*, CC, compresseur, EE, détendeurs conjugués par un arbre découplable en X. RR, refroidisseur à air et à eau.

d'avarie avec l'une des machines, on découple l'arbre des manivelles en X, et l'on marche avec le moteur en bon état. On reconnaît facilement sur cette machine les organes décrits à propos de la machine représentée par les figures 69 et 70.

Machines de M. Matthews

Les machines de M. Matthews, construites par MM. Matthews et Goodfellow, de Hyde, sont de date récente [1] et présentent plusieurs particularités de détail très remarquables.

Les fig. 76 et 77 représentent une machine Matthews à cycle fermé.—L'air, au sortir du compresseur D, traverse deux refroidisseurs : il arrive d'abord, par le tuyau J, au refroidisseur à eau E, d'où il passe dans la colonne cloisonnée *c*, qui l'amène, par X, au refroidisseur à air E_2, dont les tubes sont entourés par l'air froid qui revient de la chambre froide au compresseur suivant le trajet W E_2 V.

1. Brevets anglais 5648 de 1886, 4780 de 1887. *The Engineer*, et *Industries*, 5 oct. 1888.

La distribution s'effectue au détendeur par des robinets Corliss (fig. 78 et 79). — L'air comprimé et refroidi arrive aux robinets d'admission I par la lumière i_2, lorsqu'elle vient en face du canal i, en même temps que les lumières i_1 i_4 arrivent en face du canal i_5. Quand le robinet est fermé, comme sur la figure 80, la pression exercée par l'air comprimé en i est équilibré par celle qu'il exerce en i_3 dans la saignée ménagée à cet effet sur la paroi inférieure de l'enveloppe du robinet. Le boisseau du robinet est, en outre, percé aux extrémités de trous i_6, qui laissent l'air comprimé passer sur ses deux faces i_7, de manière qu'il soit à peu près équilibré suivant sa longueur. — Le boisseau

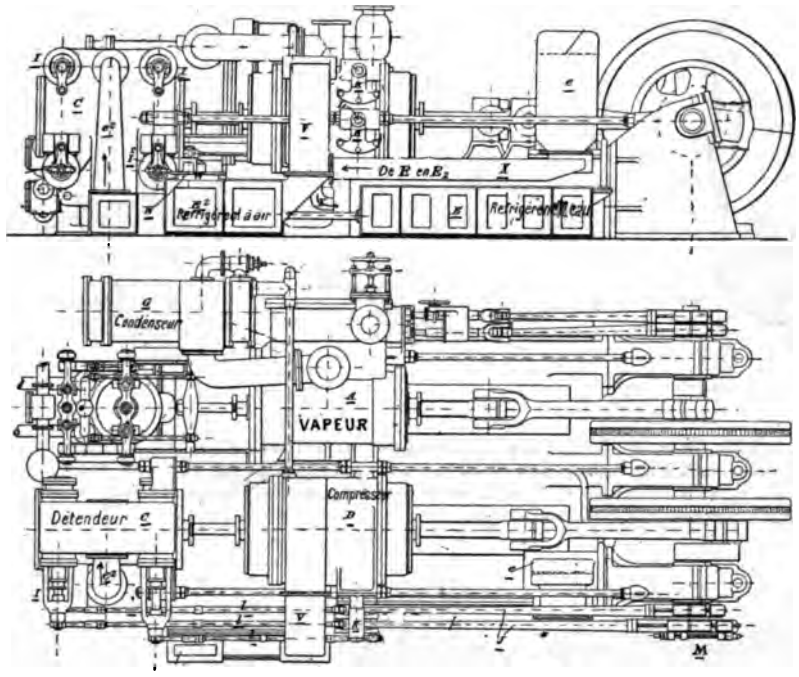


Fig. 76 et 77. — *Matthews. Machine horizontale simple.* A, cylindre moteur, C, détendeur, D. compresseur, II, robinets Corliss commandés par le mécanisme M, K. *e*, colonne cloisonnée amenant l'air comprimé au refroidisseur E. X, tuyau amenant l'air comprimé de E. en E_2.
W, conduit amenant l'air e^2 de la chambre froide à l'aspiration V du compresseur suivant (*e*, W, E_2, V).

des robinets d'échappement I' est largement ouvert, de manière à éviter toute accumulation d'eau. Les robinets d'admission sont actionnés (fig. 81) par un excentrique à rayon variable M, dont la tige J attaque la bielle *l* par un renvoi de mouvement K, ayant pour effet d'accélérer la vitesse des robinets au moment de leur fermeture. — Les robinets d'échappement sont commandés de même par un excentrique à course invariable.

Les soupapes du détendeur ont une forme particulière. La soupape d'aspiration est constituée, comme nous l'avons vu (fig. 8, page 12), par un disque

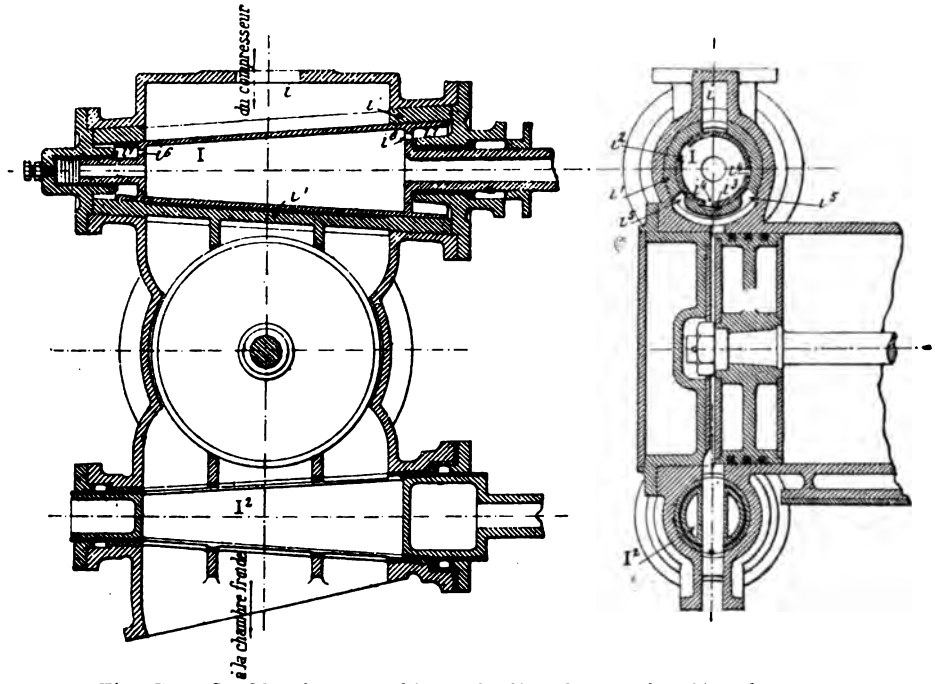


Fig. 78 et 79. *Matthews. Robinets de distribution des détendeurs.*
I, robinet d'admission équilibré longitudinalement en i^6, i^7 et latéralement en i^3 : quand la lumière i^3 vient en ι, l'admission de l'air comprimé se fait par i_2, i_4, i_5. I^2 robinet d'échappement.

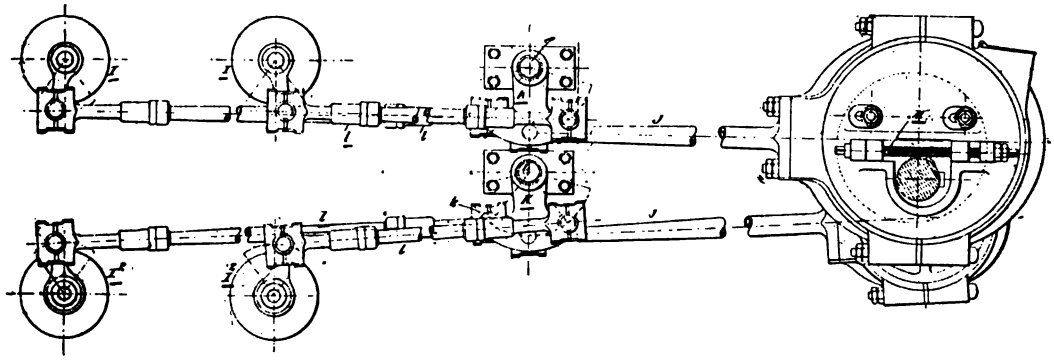


Fig. 80. — *Matthews. Mécanisme de distribution* commandant les robinets d'admission I et d'échappement I_2, par des excentriques à course variable M et des renvois accélérés K.

de laiton très mince R, d'une seule pièce ou en deux pièces, fendu radicalement, comme l'indique la figure 81, en r_3, et battant sur un plateau de

garde N, à circulation d'eau *n n*. L'eau est amenée au plateau de garde N, ainsi qu'au fond du cylindre *q*, par les tuyaux de circulation P, percés de

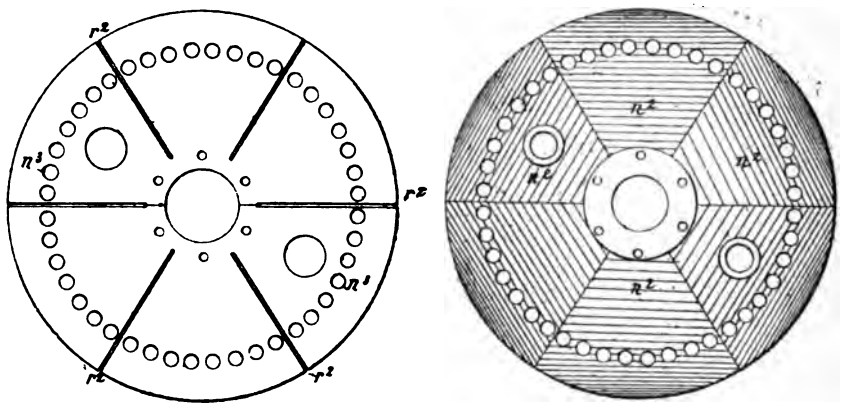


Fig. 81 et 82. — *Matthews*. Détail des clapets-disques d'aspiration et de refoulement du compresseur (fig. 8, p. 12).

trous *p*. — La soupape de refoulement est constituée, comme la soupape d'aspiration, par un disque segmenté *s*, battant sur une plaque de garde S. L'air aspiré par l'enveloppe R passe, lorsque la soupape d'aspiration se lève, au travers de nombreux orifices d'admission n^3 n^5..., dont sont percés le fond du cylindre et le plateau N : l'air comprimé est refoulé, au travers des ouvertures n_5, au-dessous de la soupape de refoulemeut.

Pour les machines très importantes, M. Matthews adopte de préférence la disposition représentée par les figures 83 et 84. Le moteur à vapeur compound est à trois cylindres : un pour la haute pression A, et deux de détente (BB), dont la vapeur s'échappe par les tuyaux 2 au condenseur H, desservi par les pompes à air II, dont le refoulement s'évacue par les tuyaux 3. — Les compresseurs DD et les détendeurs CC sont enfilés sur le prolongement des tiges des pistons de BB. L'air comprimé, refoulé par les tuyaux 4 au refroidissement EEE, à circulation d'eau, passe, par la colonne 5 et le tuyau 6, au refroidisseur à air F, qui l'amène, par le tuyau 7, aux détendeurs. — Une machine de ce type fonctionne aux abattoirs de Berkinhead, et débite 4000 mètres cubes d'air par heure.

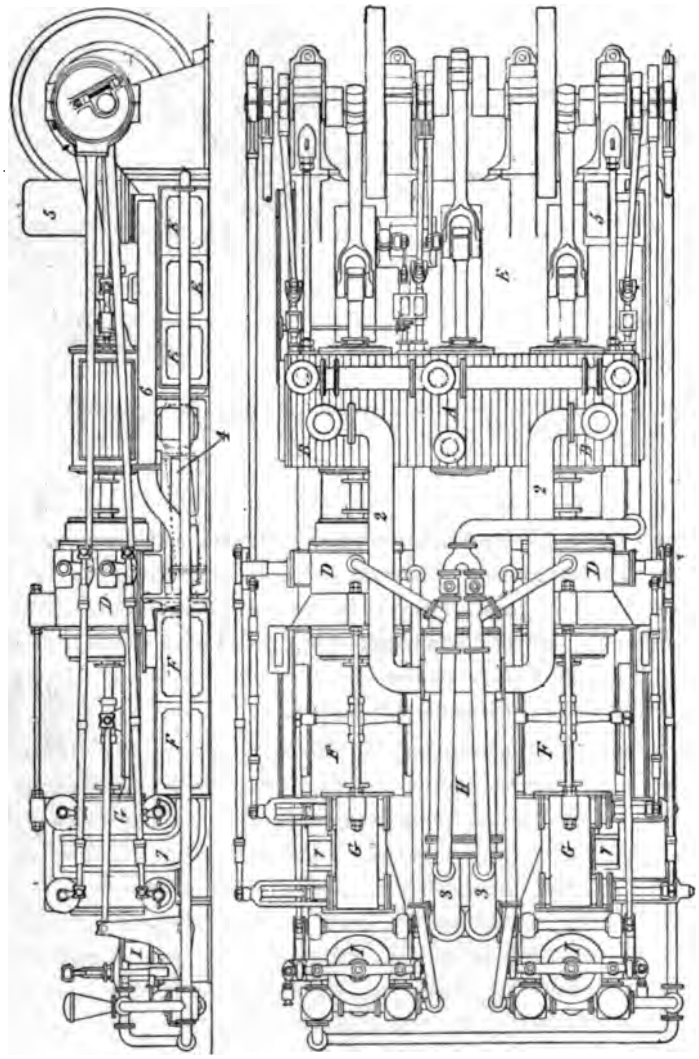


Fig. 83 et 84. — *Mattheuws. Machine de grande puissance* A, cylindre moteur de haute pression. BB, cylindres de basse pression. H, condenseur relié par les tuyaux 2, à l'échappement de BB, et par 3, 3 aux pompes à air, II. DD, compresseurs. CC, détendeurs, 4, tuyau amenant l'air comprimé au refroidisseur à eau E, d'où il passe, par 5 et 6, au refroidisseur à air FF, puis, par 7, au détendeur.

Machines à gaz liquéfiés par compression

Considérations générales. — Ces machines, dont les nombreuses variétés constituent l'espèce de beaucoup la plus répandue et la plus importante des machines frigorifiques, ne diffèrent théoriquement des machines à air que par la liquéfaction du corps travailleur pendant la période de compression. — De même que l'on peut considérer les machines frigorifiques à air comme théoriquement l'inverse des moteurs à air chaud, on peut, avec la même approximation lointaine, envisager les machines frigorifiques à gaz liquéfiés comme des moteurs à vapeur inversés, et leur appliquer en gros les mêmes considérations générales qu'aux machines à air. C'est ainsi que le rendement des machines à gaz liquéfiés diminue, comme celui des machines à air, à mesure que leur chute de température augmente, à mesure que baisse la température du bac à glace ou de l'enceinte à refroidir.

Toutefois, bien que fonctionnant d'après le même principe général, les machines à gaz liquéfiés se distinguent des machines à air par deux avantages très importants : elles sont beaucoup plus actives, et leur rendement est presque toujours beaucoup plus élevé.

L'activité plus énergique est due, comme pour les moteurs à vapeur comparés aux machines à air chaud, à ce que la chaleur spécifique en volumes des gaz liquéfiés est beaucoup plus élevée que celle de l'air comprimé aux plus hautes pressions de la pratique : le travail de liquéfaction d'un litre de gaz est beaucoup plus considérable que celui de la compression au même point d'un litre d'air, et la chaleur de vaporisation beaucoup plus grande que la chaleur de détente de l'air. En fait, pour ne citer que l'un des moins actifs parmi les gaz liquéfiables : l'acide sulfureux ; il faudrait faire passer par les cylindres d'une machine à air environ 4000 mètres cubes d'air pour produire le même froid qu'avec 1 mètre cube d'acide sulfureux liquide, bien moins actif pourtant que l'ammoniac et l'acide carbonique.

L'augmentation du rendement des machines à gaz liquéfiés est due en partie à leur activité plus énergique, qui améliore leur rendement organique en permettant d'obtenir les mêmes effets avec des mécanismes plus réduits ; mais la principale cause de cette amélioration du rendement est, qu'à réduction de volume égale, le travail de compression est bien moins élevé avec les gaz liquéfiables ; qu'il s'en perd moins en chaleur dissipée, et qu'il s'en emmagasine par conséquent une plus forte proportion dans le gaz liquéfié que dans l'air comprimé puis refroidi.

Sous une autre forme, à égalité de travail dépensé à la compression, la chute de température sera beaucoup plus élevée avec l'air, et, par conséquent, le ren-

dement plus bas : en revanche, on obtiendra avec l'air des températures beaucoup plus basses qu'avec la plupart des gaz liquéfiables, l'acide carbonique excepté.

En fait, on dépense souvent avec les machines a air, à puissances frigorifiques égales, trois et quatre fois plus de charbon qu'avec les machines à gaz liquéfiés.

Ce meilleur rendement, joint à ce fait qu'elles sont à la fois plus actives et débarrassées de tous les inconvénients inhérents à l'humidité de l'air, suffit pour justifier la préférence accordée presque universellement aujourd'hui aux machines à gaz liquéfiés dans les climats tempérés et pour les installations fixes, où il est facile de se procurer les composés chimiques nécessaires à leur fonctionnement.

D'autre part, la température finale des gaz liquéfiés étant, après leur vaporisation, moins basse que celle de l'air des machines à air, il en résulte, que leur coefficient économique s'abaisse plus vite avec l'augmentation de la température de compression ou de l'eau qui refroidit le serpentin où s'opère la liquéfaction : le rendement des machines à air reste, en conséquence, à peu près indifférent au climat, tandis que celui des machines à gaz liquéfiés baisse notablement dans les pays chauds, à mesure que s'élève le point de liquéfaction de leurs gaz.

Quant à la théorie des machines à gaz liquéfiables, bien que suffisamment avancée pour rendre compte des principales circonstances de leur marche, elle est encore très incomplète, pour des raisons qus nous avons données en parlant des machines à air, et, en outre, parce que l'étude des gaz employés dans ces machines est, elle-même, très imparfaite, ou plutôt n'a jamais été poursuivie en vue de cette application particulière.

L'insuffisance de données scientifiques exactes sur la manière dont la plupart de ces gaz se comportent aux environs du changement d'état nous met, par exemple, dans l'impossibilité de décider si un gaz liquéfiable se comporte pendant sa compression dans un cylindre de machine à glace, comme une vapeur surchauffée ou comme un gaz ; en un mot, si l'on fonctionne au régime de *saturation* ou au régime de *surchauffe*. On est encore très loin de posséder, sur ce qui se passe dans les compresseurs des machines frigorifiques, des données comparables à celles dont M. Hirn a doté l'industrie des machines à vapeur par sa magnifique étude expérimentale. Si l'on fonctionne en surchauffe, on se rapproche de l'allure des machines à air, qui permet de réaliser, mais aux dépens du rendement, des abaissements de température plus étendus qu'au régime de saturation, qu'il faut, en général, s'efforcer de maintenir comme le plus avantageux sous tous les rapports ; meilleur rendement, pressions moins élevées, moindre fatigue des organes essentiels : cylindres et soupapes des machines.

Sans pouvoir l'affirmer avec exactitude, il est néanmoins permis de penser que l'on marche à très peu près au régime de saturation, du moins avec l'ammoniac et l'acide

sulfureux, en donnant aux pistons des vitesses modérées et en refroidissant la compression par une circulation d'eau énergique : on peut du reste, mais sans que l'on ait constaté de ce fait une amélioration notable du rendement, assurer ce régime en injectant, comme le font quelques constructeurs, un peu de gaz liquéfié à chaque aspiration du compresseur.

Les machines à gaz liquéfiés se distinguent encore des machines à air par l'absence des cylindres détendeurs, remplacés par un simple robinet de détente, que l'on ouvre plus ou moins suivant l'allure de la machine. L'objet de ce cylindre est, en effet, de restituer au moteur de la machine une partie du travail de compression, en utilisant le travail de la détente comme force motrice; mais, avec les machines à gaz liquéfiés, le travail que l'on pourrait ainsi utiliser serait très faible, à peine équivalent, dans la plupart des cas, aux résistances passives du cylindre détendeur, qui ne se présente plus, dès lors, que comme une complication inutile. Aussi ne retrouve-t-on cet organe que sur quelques machines à acide carbonique. La suppression du cylindre détendeur constitue un avantage, une simplification de plus, en faveur des machines à gaz liquéfiés.

On sait, d'après les données fondamentales de la thermodynamique, qu'entre les mêmes limites de températures, la nature du corps travailleur qui décrit un cycle fermé est, en ce qui concerne le rendement du cycle, tout à fait indifférente. — Il ne saurait en être de même pour le rendement réel du moteur, dont les dimensions et, par suite, le rendement organique ne dépendent pas seulement de la chute de la température, mais aussi de la chute de pression du cycle. D'ailleurs il faut, en outre, tenir compte, pour le choix des gaz, d'autres conditions que celles du rendement : il faut faire entrer en considération leur prix d'achat ou de revient et quelques-unes de leurs propriétés physiologiques et chimiques, telles que l'innocuité, l'inflammabilité, leur neutralité plus ou moins complète vis-à-vis des métaux usuels.

Les principaux gaz employés actuellement dans les machines frigorifiques, sont l'*éther sulfurique* ordinaire, l'*éther méthylique*, le *chlorure de méthyle*, l'*acide sulfureux* et l'*ammoniac*. On a récemment proposé l'*éthylène*, (1) mais sans grand avantage *a priori*, et l'*acide carbonique*, remarquable par sa haute pression de liquéfaction et sa puissante énergie frigorifique.

La figure 86 indique l'allure probable des courbes des tensions de liquéfaction ou de saturation des premiers de ces gaz entre les températures de —50° et + 110°, et celle de la vapeur d'eau. La supériorité de l'ammoniac se manifeste clairement à l'aspect seul de ces courbes.

Les gaz simples que nous venons de citer ne sont pas les seuls que l'on emploie dans les machines frigorifiques : on y utilise aussi des mélanges de gaz liquéfiables susceptibles de réagir les uns sur les autres, de se combiner, puis de se séparer de nouveau pendant la compression et la détente, en donnant ainsi

1. Wroblewski. Comptes rendus. 2 Juillet 1884. P. 136.

lieu à des réactions favorables à l'économie des machines. On a donné à ces mélanges le nom de *liquides mixtes* : on voit sur la figure 85 le tracé de la courbe d'un de ces mélanges, dû à M. Pictet, et dont nous indiquerons les principales propriétés après avoir décrit celles des gaz simples.

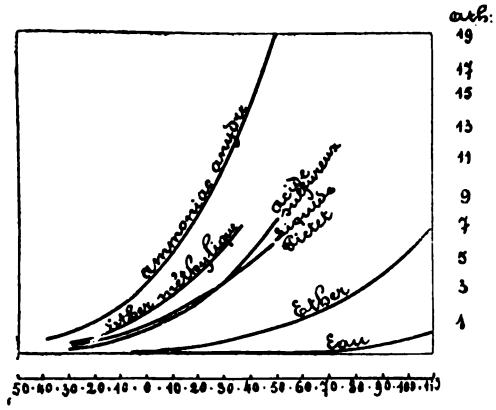


Fig. 85

Gaz simples. — *L'éther sulfurique* a été le premier des gaz liquéfiables ou vapeur gazeuse employés couramment pour les machines frigorifiques. Ses tensions de vapeur très faibles —0,6 atmosphères à 20° — permettaient en effet d'en aborder l'emploi sans craindre aucune difficulté de construction redoutable ; mais, en compensation, sa chaleur de vaporisation est très faible, de 90 calories seulement, et son énergie frigorifique est notablement inférieure à celle des autres gaz. Il en résulte qu'il exige des machines très encombrantes, des cylindres compresseurs environ trois fois plus grands que ceux des machines à ammoniac Aussi le rendement des machines à éther est-il, en général, peu élevé : la puissance indiquée au cylindre moteur y est parfois égale au double du travail du compresseur (1). En outre l'éther est très inflammable : on cite plusieurs incendies attribués à son emploi dans les machines frigorifiques.

Ces considérations suffisent pour expliquer l'abandon dans lequel sont tombées les machines à éther depuis que les progrès de la mécanique ont permi de triompher facilement des difficultés de construction inhérentes à l'emploi des gaz plus énergiques, comme l'acide sulfureux et l'ammoniac.

L'acide sulfureux se présente immédiatement après l'éther sulfurique dans l'ordre des énergies frigorifiques croissantes. Il se liquéfie sous la pression atmosphérique à la température de —10° ; à 30°, sa pression de liquéfaction est de 4 atmosphères et demie ; sa chaleur de vaporisation est de 100 calories (2). On

1. Lightfoot. Refrigerating Machinery. Inst. of Mechanical Engineers Mai 1886 p. 214.
2. 91 calories à 0° d'après Cailletet et Mathias. Comptes rendus 6 juin 1887, p. 1567.

peut se faire une idée de son énergie frigorifique réelle dans les machines qui l'emploient en disant qu'il faut compter, avec les grands appareils en bonnes conditions, que le piston du compresseur doit engendrer un volume de 9 à 10 litres environ par calorie négative effectivement transmise au réfrigérant, soit, en pratique, 1^{m3} 1/2 par minute et par quintal de glace à l'heure, chiffre déjà très notablement inférieur à l'encombrement des machines à air, dont l'énergie frigorifique maxima n'est, comme nous l'avons dit, que de 0 cal. 04 par mètre cube passé dans les cylindres, ou qui exigent, par calorie négative, le passage de 25 mètres cubes d'air environ aux cylindres.

L'acide sulfureux n'est pas inflammable comme l'éther, et on lui attribue souvent la propriété de graisser de lui même les cylindres compresseurs ; en revanche, la moindre trace d'eau ou d'air humide le transforme rapidement en acide sulfurique, qui détériore très vite les mécanismes et les serpentins ; en outre, sa fabrication, difficile et très coûteuse si on ne l'exécute pas en grand, met les propriétaires des machines à acide sulfureux à la discrétion des fournisseurs de ce produit.

En fait, depuis que l'on fabrique couramment les machines à ammoniac, les machines à acide sulfureux perdent chaque jour du terrain, sauf dans les pays chauds, où leurs basses pressions sont plus avantageuses que dans les climats tempérés.

L'éther méthylique ($C^3 H^3O$) à une chaleur de vaporisation de 200 calories, environ, double de celle de l'acide sulfureux. D'après son promoteur *M. Tellier*, ses tensions de vapeur seraient les suivantes :

Températures	Tensions	Températures	Tensions
— 20°	1^{atm},50	+ 10	3^{atm},75
— 15°	2	15	4 25
— 10°	2 25	20	4 75
— 5°	2 50	25	5
0°	2 75	30	5 25
+ 5°	3 25		

On voit, qu'à 20°, *l'éther méthylique* se liquéfie sous une pression effective de 4 atmosphères environ, au lieu des 2 atmosphères 1/2 de l'acide sulfureux et des huit atmosphères de l'ammoniac. Il n'attaque ni le fer, ni les bronzes, mais il s'enflamme facilement. Les machines de M. Tellier qui employaient ce gaz, et sur lesquelles on retrouve, très ingénieusement appliqués, un grand nombre de détails de construction brevetés depuis à nouveau par d'autres constructeurs se sont peu répandues (1). M. Tellier préparait l'éther méthylique en faisant agir à 120° de l'acide sulfurique concentrée sur de l'alcool méthylique, ou esprit de

1. Brevet anglais 387 de 1864, 368 de 1869. *Annales industrielles* 10 septembre 1871, Péclet. La *Chaleur*, (Edition Hudelo), t. III, p. 160.

bois ; on obtenait ainsi, en observant quelques précautions délicates, environ un volume d'alcool pour deux volumes d'éther.

Le *chlorure de méthyle*, dont l'emploi a été préconisé par M. *Vincent* (1) bout à 23° sous la pression atmosphérique. A 20°, sa pression de liquéfaction est de 4 atmosphères et demie.

Ce gaz n'attaque pas les métaux, mais il est inflammable, moins cependant que l'éther.

Ses tensions de vapeur sont les suivantes :

températures —	23°	0.	15.	20	25	30	35
tensions	1k.	2.48	4.11	4.80	5.60	6,50	7.5

Les machines à chlorure de méthyle, construites d'abord par M. Crespin étaient exposées dans la Galerie des Machines par leurs nouveaux constructeurs: MM. *Douane Jobin et Cᵉ*.

Nous arrivons maintenant à *l'ammoniac anhydre*, qui est actuellement, de beaucoup le gaz le plus employé dans les machines frigorifiques.

Les tensions de vapeur ou de liquéfaction de ce gaz sont les suivantes :

Températures	Tensions	Températures	Tensions
— 30°	1atm,14	5°	5atm
25	1 45	10	6 02
20	1 83	15	7 12
15	2 28	20	8 40
10	2 82	25	9 80
5	3 45	30	11 44
0	4 19	35	13 08
		40	15 29
		45	17 38
		50	19 98

A 20ᶜ, la tension de liquéfaction de l'ammoniac est donc de 8 atmosph. 40, au lieu de 3 atmosph. 30 pour l'acide sulfureux; mais sa chaleur de vaporisation très considérable, 500 calories (2), presque aussi grande que celle de l'eau, lui assure une puissance frigorifique très énergique.

Il suffit, dans les conditions ordinaires de la pratique, c'est-à-dire avec de

1. *Bulletin de la Société chimique de Paris*, t. XXXI. Brevet anglais 470 de 1879. *Revue industrielle* 18 février 1879. 26 août 1886.
2. Lightfoot. 313 cal. d'après Ledoux.

l'eau de condensation à 20° et un bain réfrigérant à — 7°, de faire passer au compresseur environ $0^{m3},500$ de gaz ammoniac par minute, pour une production de 100 kilogrammes de glace à l'heure, soit environ 3 litres par calorie négative utilisée au réfrigérant.

Théoriquement, entre les mêmes limites de température, — 15 et + 20° une même machine donnerait, par mètre cube de gaz aspiré au compresseur :

Avec l'ammoniac	560	cal. négatives
Avec l'acide sulfureux	200	—
Avec l'éther sulfurique	30	—

Le rendement théorique, indépendant de la nature du corps, serait le même pour ces trois gaz : de 0 cal. 018 environ par kilogrammètre indiqué au compresseur (1).

Entre — 30 et + 20°, le rendement tombe à 0 cal. 0093. Mais ces rendements théoriques ne sont jamais atteints dans la pratique, à beaucoup près, car il ne faut pas compter, même avec les meilleures machines à ammoniac, et dans les conditions les plus favorables ,sur une production de glace de plus de 25 à 30 kilogrammes par kilogrammes de charbon, ou de 40 kilogrammes par cheval-heure indiqué au compresseur; c'est-à-dire, sur un rendement de plus de 0 cal. 015 par kilogrammètre indiqué au compresseur.

L'ammoniac liquéfiée constitue un liquide incolore, d'une densité de 0,76 environ, s'alliant en toute proportion et avec un dégagement de chaleur à l'eau, pour laquelle il possède une grande affinité. La moindre fuite d'ammoniac dans l'air se décèle non seulement par son odeur caractéristique, mais aussi par la formation d'un nuage de vapeurs blanches, dues principalement à l'absorption de l'humidité de l'air par l'ammoniac.

En résumé, l'ammoniac se présente comme un gaz d'une puissance frigorifique considérable, sans développer, dans les climats tempérés du moins, des pressions exagérées ni même difficiles à tenir avec des appareils bien construits (12 atmosphères à 30°). Ce gaz n'est pas inflammable; moins toxique et plus actif que l'acide sulfureux, il se prépare très facilement en partant de l'ammoniac ordinaire du commerce, qu'il suffit de distiller au moyen d'appareils fort simples, fournis d'ordinaire avec la machine frigorifique dont l'acquéreur ne dépend plus alors de personne pour son approvisionnement. Ces avantages suffisent pour expliquer la préférence donnée presque partout aujourd'hui au gaz ammoniac.

L'acide carbonique est, de beaucoup, le gaz le plus énergique employé dans les machines frigorifiques. Il exigerait, en effet, à puissances frigorifiques égales, d'après M. Windhausen, des compresseurs 50 fois moindres qu'avec l'éther, 25

1. Ledoux, p. 51.

fois moindres qu'avec l'acide sulfureux, et 15 fois moindres que pour l'ammoniac, bien que sa chaleur de vaporisation soit, d'après M. Mathias, très faible : 51 cal. à 6°. En revanche, ses pressions de liquéfaction sont très élevées, comme on le voit d'après le tableau ci-dessous :

Températures	Pression de liquéfaction
— 30°	10atm.
— 20	22
— 15	25
— 10	28
— 5	33
0	38
+ 10	46
15	50
20	57
30	75
40	90
45	100

Dans la pratique, les machines à acide carbonique fonctionnent entre des pressions limites de 20 atmosphères à l'aspiration et de 70 atmosphères à la compression, parfois même de 90 atmosphères.

L'acide carbonique atteint en effet son point critique à 31°. A partir de ce point, où le liquide et l'atmosphère gazeuse qui la surmonte, de mêmes densités à peu près, se dissolvent l'un dans l'autre en formant un mélange encore mal défini et de chaleur de vaporisation presque nulle, la liquéfaction du gaz devient très difficile (1). L'acide carbonique n'attaque pas sensiblement les métaux : son liquide, incolore et de densité 0,9, flotte sur l'eau comme de l'huile, sans s'y mélanger : il est, au contraire, très soluble dans l'éther, dans les huiles essentielles et l'acide sulfureux, avec lesquels il forme des mélanges réfrigérants très énergiques, descendant jusqu'à — 80° à l'air libre et à — 103° dans le vide.

La fabrication de l'acide carbonique par la réaction de l'acide sulfurique sur le carbonate de chaux est très simple et peu coûteuse : certains procédés le produisent actuellement d'une façon tout à fait industrielle (2), et on livre aujourd'hui l'acide carbonique liquide, dans des bombonnes en fer ou en acier, pour une foule d'applications très diverses.

Il ne reste donc plus à vaincre, pour généraliser l'emploi de l'acide carbonique dans les machines frigorifiques, que les difficultés de construction inhérentes à

1. Andrews Phil. trans 1869 p. 575. J. Thomson. Proc Royal Society, London 1871. Van der Waals Over de continuitèit van den gas en Vloestofrustand. Leyde 1873 p.56. Maxwell Theory of Heat p.125. Clausius *Annales de chimique et de physique*, nov. 1884. Cailletet, Collardeau et Mathias et Guye, comptes rendus, 24 juin 16 septembre 1889 et 20 janvier 1890.

2. Herbertz et Guéret, brevets anglais 8617 de 1864 14927 de 1887. Gall, Société d'encouragement, mars 1889. — Hazenorl, *Génie civil*, 4 janv. 1890, p. 237.

ses hautes pressions de liquéfaction ; ces difficultés ne sont pas insurmontables, on peut même affirmer que les plus graves d'entre elles ont déjà été vaincues.

Les liquides mixtes. — *Machines à liquides binaires.* — C'est, croyons-nous, à MM. Tessié du Motay et Rossi que l'on doit attribuer la première idée d'utiliser dans les machines frigorifiques à compression les liquides mixtes ou binaires, c'est-à-dire, constitués par le mélange de deux liquides volatils susceptibles de se séparer en se vaporisant à de certaines pressions, puis de se recombiner ensuite lorsqu'on augmente ces pressions. Dans cette recombinaison, l'affinité chimique entre en jeu pour aider à la liquéfaction du mélange et soulager d'autant le travail du compresseur, pourvu que l'on enlève par une circulation d'eau suffisant la chaleur de cette combinaison.

MM. Tessié du Motay et Rossi (1) ont choisi comme liquides mixtes les combinaisons fournies par l'éther ordinaire, l'acide sulfureux ou le gaz ammoniac. L'éther absorbe à la température de 0° environ 50 % de son poids d'acide sulfureux et 6 % de son poids d'ammoniac. Le résultat est un liquide incolore, stable à la température ordinaire, comme l'éther. Alternativement raréfié puis comprimé, ce liquide se comporte dans la circulation d'une machine à compression comme l'éther ordinaire, mais avec une énergie frigorifique plus considérable ; il présente en outre sur l'éther l'avantage de ne pas s'enflammer et, dit-on, de graisser naturellement les organes du compresseur, comme le ferait l'acide sulfureux.

On obtient ainsi une marche presque aussi active qu'avec l'acide sulfureux, mais à pressions moindres : une atmosphère et demie au plus. Quelques machines fonctionnent aux Etats-Unis avec les liquides binaires de MM. du Motay et Rossi, notamment aux forges de M. H. Delamater, à New-York ; il y a tout lieu de penser qu'elles sont préférables aux machines à éther, et, en tout cas, plus sûres, puisque leur liquide n'est pas inflammable.

Au lieu de chercher à diminuer les pressions de liquéfaction déjà trop basses de l'acide sulfureux, M. Pictet (2) s'est, au contraire, efforcé de les relever, en l'associant avec l'acide carbonique, qu'il peut absorber en toutes proportions en formant une série de liquides binaires dont le point d'ébullition varie de — 70° à — 7°, suivant leur richesse en acide carbonique. Celui de ces liquides choisi par M. Pictet a pour formule symbolique CSO^4 ; son point d'ébullition est de — 19°. Comme tous les liquides de la série, il se décompose aux basses températures en une suite de liquides intermédiaires émettant chacun des vapeurs pour leur compte et se recombinant aux températures ordinaires sous une pression modérée. Il en résulte qu'aux basses températures — dans les serpentins du bac à glace, par

1. Brevets anglais 2864 de 1886, 2548 et 2549 de 1888. — *Engineering*, août, 1888.

2. Brevets anglais 292 et 1284 de 1880, 16557 de 1884, 12514 de 1889. — *The Engineer*, 20 août 1880, p. 144.

exemple — la tension, égale à la somme des tensions élémentaires de l'acide carbonique et de l'acide sulfureux, sera plus grande que celle de l'acide sulfureux, tandis, qu'aux températures ordinaires, elle pourra être peu différente. C'est, en effet, ce qui a lieu : les tensions respectives du liquide (CSO^4) et de l'acide sulfureux sont de 3 atm. 40 et 3 atm. 30 à 20°, de 2 atm. 20 et de 1 atm. 90 à 5°. A 35°, les tensions sont égales ; à 50°, elles sont de 6 atm. 86 pour le liquide binaire et de 8 atm. 3 pour l'acide sulfureux. Il y a donc économie de force motrice ou diminution du travail du compresseur parce que, toutes choses égales, la pression augmente à l'aspiration ; une partie du travail de liquéfaction est opéré par le jeu de l'affinité chimique qui s'exerce entre l'acide carbonique et l'acide sulfureux aux températures ordinaires de la compression, et dont on n'a qu'à dissiper la chaleur dans l'eau du condenseur.

Voici d'ailleurs textuellement l'exposé que M. Pictet a présenté de sa découverte devant l'Académie des Sciences, le 9 février 1885.

« Dans les machines frigorifiques actuelles, fonctionnant au moyen de liquides volatils simples, comme l'ammoniaque, l'éther sulfurique ou méthylique, l'acide sulfureux, on utilise, comme source de froid, le passage de l'état liquide à l'état gazeux, sans qu'aucun phénomène chimique intervienne. J'ai donné, dans une note précédente, la relation qui lie les variations de température de ces liquides avec les tensions de vapeur correspondantes. Cette relation montre que, quel que soit le liquide volatil, le nombre de kilogrammètres dépensés par la pompe de compression de la machine frigorifique est constant, pour un même écart de température entre le condenseur et le réfrigérant de l'appareil frigorifique et un même effet frigorifique. Les différents systèmes de machines ne diffèrent que par les tensions absolues des vapeurs sur les deux faces du piston compresseur, et par les détails dans le dispositif.

« Une théorie entièrement nouvelle apparaît lorsque, au lieu d'employer un liquide volatil unique et fixe, on emploie un liquide volatil *susceptible de se dédoubler en deux ou plusieurs liquides volatils par le simple fait d'un abaissement de température*. En d'autres termes, si l'on peut trouver deux ou plusieurs liquides volatils qui s'associent ensemble d'autant plus intimement que la température s'élève davantage (entre certaines limites) et qui se dissocient plus ou moins complètement aux basses températures, la relation entre les tensions maxima des vapeurs émises par ce mélange et les températures correspondantes diffère absolument de celle qui est commune à tous les liquides volatils simples.

« Pour fixer les idées, et montrer comment cette conception théorique vient d'être sanctionnée par la pratique, j'exposerai d'abord quelques considérations générales sur les relations qui existent entre les liquides volatils, leur température d'ébullition et leur constitution chimique.

« En utilisant les méthodes graphiques pour l'étude de ce problème, nous pouvons formuler la loi générale suivante : Lorsqu'on associe de l'oxgyène à

une molécule quelconque d'un liquide volatil, on diminue toujours son pouvoir volatil, et la température du point d'ébullition du nouveau liquide s'élève. Cette fixation de l'oxygène peut être physique ou chimique, par dissolution ou par combinaison.

« *Exemples.* — L'oxyde de carbonne bout à — 140°, l'acide carbonique bout à — 75°, et l'eau de seltz ordinaire n'est que l'association, par dissolution de l'oxyde d'hydrogène à l'acide carbonique.

L'acide sulfureux bout à — 10°, l'acide sulfurique anhydre bout à + 32°, et l'acide sulfurique hydraté bout à + 326°.

L'éther sulfurique bout à + 35°,5, l'alcool absolu correspondant, dont la molécule a plus d'oxygène, bout à + 78°,3, l'alcool hydraté bout à des températures supérieures à 78°,3.

L'azote bout à — 180°, l'acide hypoazotique à + 25°, l'acide azotique à + 50°, le même monohydraté à + 85°, et quadrihydraté à 123°.

Le chlore bout à — 40°, l'acide hypochloreux à + 20, et l'acide chlorique 137°,5.

« En résumé, l'association de l'oxygène à diminuée, atténué le pouvoir volatil des liquides primitifs.

« J'ai appliqué cette loi à l'acide carbonique.

« En oxydant par voie de dissolution l'acide carbonique, on produit toute une série de liquides volatils dont les points d'ébullition s'échelonnent entre — 70° et — 7°,5. J'ai oxydé l'acide carbonique en l'associant à l'oxyde de soufre, et voici les symboles qui représentent ces diverses combinaisons avec leur température d'ébullition.

	Température d'ébullition.		Température d'ébullition.
$C^{40}O^{82}S$ (acide carbonique presque pur).	+ 71	$CO^{6}S^{3}$	— 15°
$C^{30}O^{62}S$	— 54	$CO^{8}S^{3}$	— 12
$C^{20}O^{42}S$	— 41	$CO^{10}S^{4}$	— 9,5
$C^{10}O^{22}S$	— 26	$CO^{12}S^{5}$	— 8,6
$CO^{4}S$	— 19	$CO^{14}S^{6}$	+ 8
		$CO^{16}S^{7}$	— 7,5

« On peut donc constituer un liquide quelconque entrant en ébullition à n'importe quelle température comprise entre — 71° et — 7°.

« De plus, voici la propriété générale de tous ces liquides : aux températures élevées, l'association des composants est complète ; aux basses températures, le liquide volatil se décompose en une série de liquides intermédiaires, émettant chacun des vapeurs pour son compte.

« Si l'abaissement de température est très considérable, à — 30° ou — 40°, les liquides volatils $CO^{12}S^{5}$, $CO^{16}S^{7}$, $CO^{6}S^{3}$ se décomposent d'une manière visible dans le matras de verre où ils sont scellés, et l'on voit apparaître une émulsion

blanchâtre dans la masse du liquide, émulsion qui se transforme, après un certain temps, en deux ou trois liquides transparents, séparés par des nappes horizontales; les liquides s'étageant par ordre de densité. Nous n'avons pas encore pu analyser ces liquides, mais nous communiquerons bientôt le résultat de ces recherches.

« Il résulte de cet ensemble des faits une anomalie apparente, très extraordinaire, quant à la courbe des tensions maxima des vapeurs émises par ces liquides mixtes. En effet, plus la température s'abaisse, plus le liquide primitif se décompose en liquides élémentaires volatifs, émettant chacun des vapeurs : la somme de toutes ces tensions élémentaires est bien plus considérable que celle qui correspondrait à un liquide fixe unique. Par contre, aux températures supérieures, tous ces liquides se combinent en un seul; la tension maximum des vapeurs est sensiblement réduite sous l'influence des affinités qui se développent.

« Pour mettre ce point tout à fait en lumière, car il est le but essentiel de cette communication, je donne ci-après les tensions de vapeurs du liquide dont le symbole est SCO^4, comparativement à celles de SO^2 seul.

Températures. o	SCO^4 atm	SO^2 atm	Températures o	SCO^4 atm	SO^2 atm
— 30	0,77	0,36	+ 10	2,55	2,35
— 25	0,89	0,05	+ 15	2,98	2,60
— 20	0,98	0,61	+ 20	3,40	3,30
— 19	1,00	0,63	+ 25	3,92	3,8
— 15	1,18	0,76	+ 30	4,45	4,6
— 10	1,34	1,00	+ 35	5,05	5,3
— 5	1,60	1,25	+ 40	5,72	6,2
— 0	1,83	1,51	+ 45	6,30	7,2
+ 5	2,20	1,90	+ 50	6,86	8,3

« Il ressort donc, de tout ce qui précède, une conséquence très considérable comme résultat pratique. Si l'on introduit dans une machine frigorifique le nouveau liquide volatil SCO^4, la tension des vapeurs dans le réfrigérant sera très supérieure à celle de l'acide sulfureux pur, tandis que la tension à la compression, dans le condenseur où les vapeurs repassent à l'état liquide, sera sensiblement moindre que celle des vapeurs d'acide sulfureux. Le piston compresseur recevra ainsi une poussée plus forte à l'aspiration, moins forte à la compression, d'où résultera une grande économie dans le travail nécessaire pour le fonctionnement de la pompe. C'est le travail dû aux actions physico-chimiques, associant les liquides élémentaires, qui soulage directement le moteur mécanique extérieur.

« La formation de ces nouveaux liquides volatils, leurs propriétés physico-chimiques, ouvrent donc une voie nouvelle aux appareils destinés à produire les basses températures et à les utiliser industriellement. »

Les principales propriétés du liquide binaire de Pictet sont représentées

par la courbe des pressions de ce liquide (fig. 87) qui domine celle de l'acide sulfureux de — 45° à + 20°, puis s'abaisse au-dessous d'elle à partir de ce point, c'est-à-dire aux températures moyennes de la compression.

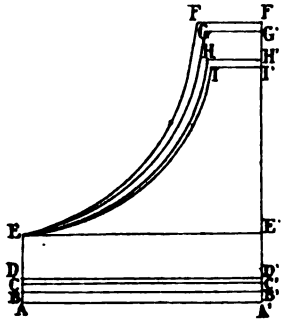


Fig. 86. — Travaux de liquéfaction correspondant aux courbes de la fig. 88, de — 15° à + 30°.

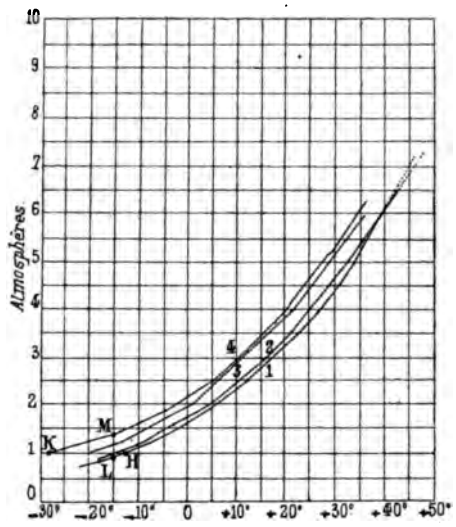


Fig. 87. — Courbes des pressions de liquéfaction en fonction des températures. I, acide sulfureux, 2 et 3, acide sulfureux et acide carbonique, 4, acide sulfureux saturé d'acide carbonique.

Les courbes de la figure 87 tracées d'après un récent brevet de M. Pictet donnent, entre — 30° et + 50°, les pressions de liquéfaction (1) de l'acide sulfureux, (4) de l'acide sulfureux saturé d'acide carbonique, (2) et (3) celles des composés intermédiaires. A la pression atmosphérique, l'acide sulfureux pur se liquéfie en H, à — 12° — et l'acide saturée à — 30°, en K, donnant, à volumes de vapeurs égaux, une fois et demie plus de froid. A' — 15°, la pression M du gaz saturé est de 1atm.,4, tandis que la pression L de l'acide sulfureux n'est que de 0,9 atmosphères.

D'après la figure 86, qui représente les travaux de liquéfaction correspondant avec du gaz aspiré à — 15° et liquéfié à + 30° figurés par les aires

D D_1 I_1 E D pour l'acide sulfureux pur
A A_1 F_1 F E A pour l'acide sulfureux saturé
B E G G_1 B_1 B
C E H H_1 C_1 C } pour les mélanges des courbes 2 et 3,

on voit que le travail correspondant à l'acide sulfureux saturé d'acide carbo-

nique est loin d'être une fois et demi plus grand que celui de l'acide sulfureux pur.

Cette considération explique comment on aurait d'autre part constaté [1] d'après M. Pictet, par la substitution seule du liquide (CSO^4) à l'acide sulfureux, une économie ou augmentation du rendement de 50 % (340 kilogrammes de glace au lieu de 215 kilogrammes) ; mais il est permis d'élever quelques doutes à ce sujet, car l'emploi du liquide binaire ne s'est pas répandu depuis la date de cet essai (1885).

M. Pictet a proposé pour la fabrication de son liquide mixte d'acide carbonique et d'acide sulfureux, l'appareil représenté par les figures 88 dans lequel on utilise la réaction qui se produit à 320° environ entre le carbone et l'acide sulfurique concentré à 66° Beaumé. Cette réaction produit un mélange d'acide sulfureux et d'oxyde de carbone ; en y ajoutant un équivalent de carbone et deux d'oxygène, produits par la décomposition du carbonate de chaux au moyen de l'acide chlorhydrique ou sulfurique, on obtient le mélange gazeux binaire de Pictet : CSO^4.

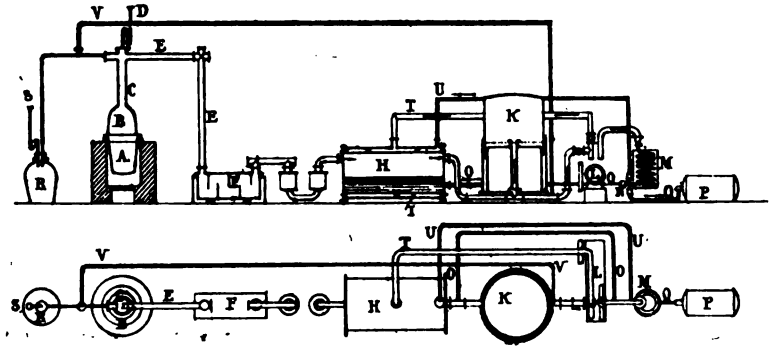


Fig. 88. — Fabrication du liquide Pictet (CSO^4).

La cornue en fonte A renferme 250 à 300 kilogrammes de charbon chauffé à 320° environ, sur lequel on fait tomber, par D, un filet contenu d'acide sulfurique. L'acide carbonique se produit en R et se mélange en E aux produits de la cornue A, pour se rendre dans le récipient H, après s'être débarrassé de la plupart de ses impuretés physiques en F. Du récipient refroidisseur H, le mélange se rend au gazomètre K, d'où la pompe L l'aspire pour le liquéfier, au travers du serpentin M, dans le liquéfacteur P. Le bas du serpentin M communique en outre, par U, avec l'enveloppe du refroidisseur H, et, par O, avec l'intérieur de cette chambre. On commence par diriger toutes les vapeurs dans l'enveloppe de H, où elles s'accumulent en se liquéfiant, puis on met, par T, cette enveloppe

1. Nouvelles machines frigorifiques, Genève, H. Georg, 1885, p. 32.

en communication avec l'aspiration de la pompe L, de sorte que l'évaporation du liquide de l'enveloppe I l'abaisse à — 20° environ : on maintient ensuite cette température pendant toute la durée de l'opération en réglant convenablement l'ouverture du tuyau T. Le compresseur L aspire dès lors les vapeurs directement du gazomètre K et les liquéfie en M, d'où elles repassent, par N O, en H, à la pression du gazomètre K, c'est-à-dire à la pression atmosphérique. Sous l'influence de cette chute de pression, le liquide bout spontanément en abandonnant le petit excès d'acide carbonique ajouté intentionnellement au mélange, et qui retourne à la pompe après s'être mêlé de nouveau aux vapeurs qui arrivent directement de A au gazomètre. C'est la hauteur même du gazomètre qui indique l'importance de l'excès ou du manque d'acide carbonique, et permet de régler en conséquence la marche de l'opération. Il s'accumule ainsi en H un grand volume de liquide Pictet à — 20°, que l'on recueille directement dans les bonbonnes en cuivre, ou en P, après les avoir fait repasser par la pompe et le serpentin M. L'excédent d'acide carbonique revient du gazomètre en R, par V, s'ajouter à celui que produit la réaction de l'acide sulfurique sur le carbonate de chaux.

M. *Quiri* (1) a proposé ensuite, en 1886, l'emploi de liquides binaires d'acide sulfureux, de sulfure de carbone et de divers hydrocarbures. Nous ne connaissons aucune application des machines de M. Quiri qui emploient, comme celles de Pictet, des condenseurs à tubes en U et des soupapes silencieuses à *dash-pots*.

Principaux organes des machines à gaz liquéfiés par compression.

Les organes essentiels de toute machine à gaz liquéfiés par compression sont comme pour les machines à air, au nombre de quatre :

le *compresseur* ou la pompe ;
le *refroidisseur-condenseur* ou liquéfacteur ;
le *détendeur ;*
le *réfrigérant ;*

Nous allons exposer les principales particularités de ces différents organes, qui, bien qu'essentiellement les mêmes dans les différentes machines, se distinguent néanmoins les uns des autres par de nombreux détails de construction, parfois très importants suivant la nature des gaz à liquéfier.

1. Brevet anglais 14606 de 1886.

Compresseur. — Le compresseur peut être à simple ou à double effet, vertical ou horizontal. On y distingue comme éléments principaux :

les *soupapes ;*

les *garnitures* ou stuffing-box ;

les *pistons ;*

les *moyens de refroidissement.*

Les compresseurs à double effet sont les plus employés ; on les place ordinairement dans le prolongement des cylindres des moteurs à vapeur horizontaux qui les actionnent directement. Ils sont plus actifs et moins chers que les compressions à simple effet ; c'est pour cela qu'on les emploie de préférence : mais les cylindres horizontaux s'usent plus vite, parce qu'ils s'ovalisent. Les joints et garnitures des cylindres à double effet, soumis à la pression de liquéfaction et plus difficiles à maintenir étanches, absorbent un travail de frottement plus considérable.

Les compresseurs à simple effet sont presque toujours verticaux; les soupapes d'aspiration et de refoulement sont ordinairement placées dans le haut, de sorte que le stuffing-box n'est jamais au contact direct du gaz à comprimer, et n'a guère à se défendre que des fuites du piston. Les compresseurs à simple effet sont le plus souvent au nombre de deux, accouplés par manivelle à 180°, et disposés de façon que l'avarie de l'un n'entraîne pas l'immobilisation de l'autre. Malgré leur prix plus élevé et leur encombrement plus assujettissant, les compresseurs verticaux commencent à se répandre beaucoup (*Vincent*, *Fixary*, *Lavergne*, *Windhausen* et *Frick*), parce que leur conduite est plus facile, leur entretien moins onéreux et leur durée plus prolongée. Rien ne s'oppose d'ailleurs à ce qu'on les fasse à double effet, mais, à notre avis, sans aucun avantage réel (1).

Soupapes. — Les soupapes les plus fréquemment employées sont en fer ou en acier, coniques et à ressort : leurs mouvements sont presque toujours automatiques, c'est-dire déterminés par la pression même des gaz, rarement desmomodromiques, comme dans les machines à éther de *Harrisson* (2) et de *Dubern* (3).

Il importe que ces soupapes, celles du refoulement surtout, fonctionnent sans chocs. On évite ce choc en les munissant d'un amortisseur *dash-pot* gazeux, comme dans les machines de *Pictet*, de *Quiri* et de *Wood* (4), ou liquide, comme celles de *Lavergne* (5). Dans cette dernière machine, la soupape de refoulement occupe seule tout le haut du compresseur : elle fonctionne dans un bain d'huile

1. Exemple : la machine de l'*Artic* a un seul cylindre de 430mm × 1m faisant 40 tours par minute et 45 tonnes de glace par jour (*Engineering*, 8 fév. 1889).
2. Brevet anglais 2362 de 1857.
3. id. 4579 de 1882.
4. Brevets anglais 16558 de 1884 et 14606 de 1886.— *The Engineer*, 4 fév. 1887.
5. *Revue industrielle*, 28 juillet 1888.

dont elle force une partie à s'écouler, lors de sa levée, au travers d'orifices étranglés, qui en amortissent le lancé par leur résistance. Une disposition analogue avait été proposée, en 1832, par MM. *Wood* et *Richmond* (1) : le piston chargé

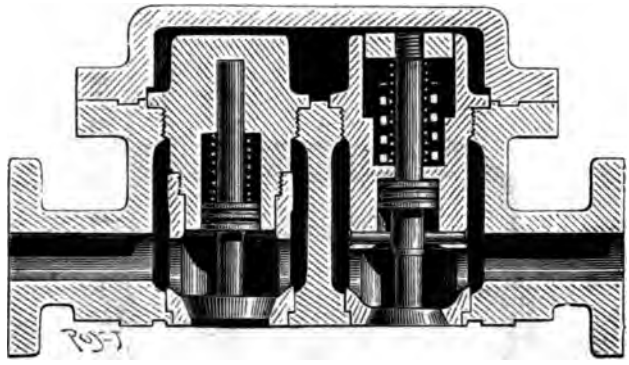


Fig. 89. — Soupapes d'aspiration et de refoulement du compresseur vertical Wood.

d'huile soulevait par la compression du gaz une soupape annulaire faisant cloche au-dessus du cylindre, et ramenée par l'élasticité d'un tampon de caoutchouc. Les soupapes doivent être, en outre, parfaitement accessibles : celles des machines de *Kilbourn* (2), *Fixary* (3), *Lavergne*, *Quiri* et *Wood* satisfont pleinement à cette condition importante. Les soupapes des machines *Wood* sont enfermées (fig. 89) dans des chapeaux qu'il suffit de dévisser pour avoir le tout dans la main (soupape, ressort, *dash-pot* et siège); elles peuvent, en outre, se régler très facilement en tournant de l'extérieur l'écrou de leur ressort (4).

On a quelquefois, dans certaines machines à éther, notamment dans celles de *Blée* (5), cherché à diminuer le travail d'aspiration en équilibrant les soupapes ; mais c'est une complication plus nuisible qu'utile.

Il faut, en tout cas, toujours munir, dans les machines verticales surtout, les soupapes d'aspiration d'un étrier ou d'un écrou de sûreté, empêchant, comme dans les machines de *Wood* (6) et de *Fixary*, la chute de la soupage en cas de rupture de son ressort ou de sa tige, et leur assurant ainsi autant de sécurité qu'aux distributeurs desmodromiques. Nous ferons remarquer incidemment, à ce propos, que les machines verticales commandées par courroies présentent, à cause de leur moindre volant, en ce qui concerne les ruptures par obstruction

1. Brevet anglais 5798 de 1882.
2. *Engineering*, 20 octobre 1882.
3. Haton de la Goupillière, *Cours de machines*, p. 888.
4. *The Engineer*, 4 février 1887.
5. Brevet anglais 3005 de 1861.
6. id. 7824 de 1885.

accidentelle des cylindres, plus de sécurité que les compresseurs horizontaux rigidement reliés au moteur à vapeur.

Stuffing-box. — Le suffing-box est, en sa qualité de joint mobile, le plus

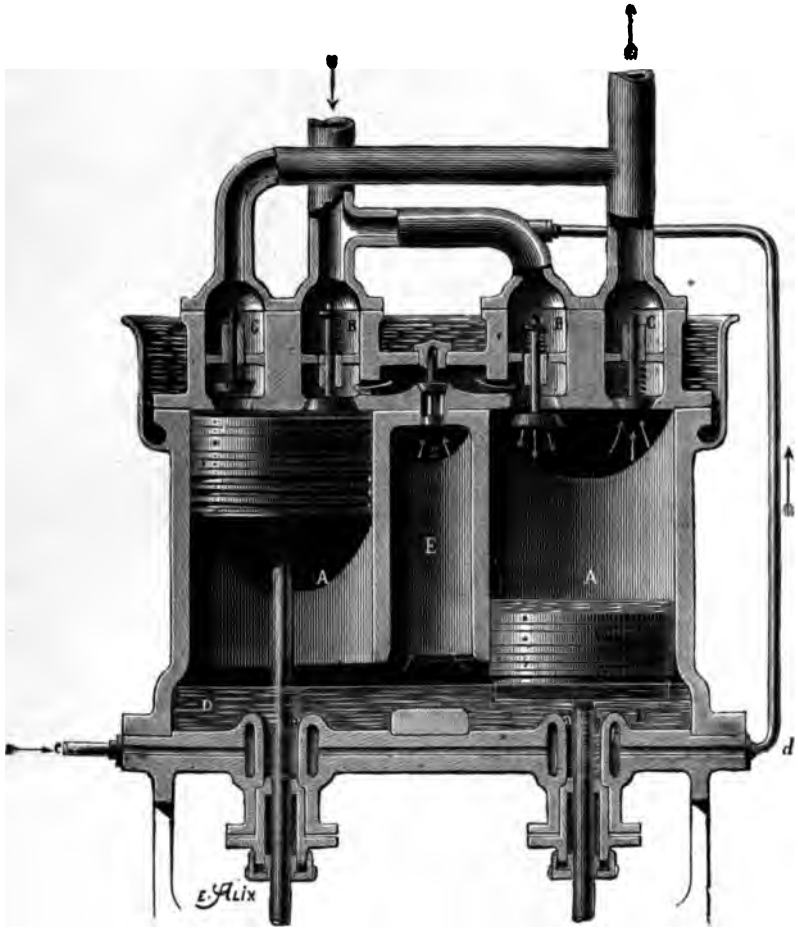


Fig. 90.— *Joint pâteux Fixary.*
Application aux compresseurs verticaux à simple effet.

Légende. — Les deux compresseurs AA' communiquent au bas par une nappe d'huile D ; les pistons viennent baigner à chaque coup dans cette huile par leurs cannelures inférieures sans segments, qui en ramènent une partie le long des parois des cylindres. Ils sont en outre chargés d'une couche d'huile qui supprime tout espace nuisible aux soupapes de refoulement C. Les fuites d'ammoniac aux pistons se recueillent dans la chambre d'équilibre E, d'où elles retournent aux soupapes d'aspiration B dès que leur pression dépasse la charge de la soupape d'équilibre *s*.

Une dérivation de l'ammoniac détendu, amené par le tuyau *c*, retourne à l'aspiration par *d* en circulant en *bb* autour de la gaine d'huile *aa* des tiges de pistons : cette huile, considérablement refroidie, constitue en *aa* le joint pâteux. La même disposition s'applique aux compresseurs à double effet.

difficile à tenir, principalement dans les compresseurs à double effet, où il est soumis à toute la pression du refoulement. La solution la plus anciennement employée consiste à faire le stuffing-box double, et à ménager entre les deux garnitures un espace en communication avec l'aspirateur du compresseur. Les fuites qui échappent à la première garniture sont ainsi récupérées par l'aspiration même du compresseur, et la seconde garniture n'a plus à résister qu'à la pression d'aspiration. Cette pression, négative dans le cas des machines à éther, n'est que de 1 kilogramme à 1 kil. 5 absolus pour les machines à gaz ammoniac, mais elle est déjà très élevée pour les machines à acide carbonique; aussi M. *Raydt* a-t-il fait rendre les fuites de sa première garniture non pas dans l'aspiration du compresseur, mais dans un petit gazomètre spécial, qui les restitue de temps en temps à la circulation (1). Pour les machines à ammoniac, les garnitures sont presque toujours à joint d'huile, c'est-à-dire constituées en grande partie par un bain ou une gaîne de pétrole, dont une fraction passe, à chaque coup du compresseur, dans la circulation du graissage; tel est le cas des machines de *Linde*, *Wood*, *Lavergne*. On en retrouve un exemple remarquable dans la machine à éther méthylique de *Tellier* (2). Comme cas particulier, je citerai celui des machines verticales de *West*, dont les compresseurs, les bielles et les manivelles sont entièrement enfermés dans une enveloppe pleine d'huile; les cylindres des compresseurs n'ont aucune garniture et plongent dans cette huile; le stuffing-box est reporté à la pénétration de l'arbre moteur dans l'enveloppe générale, qui rend malheureusement le mécanisme inaccessible (3). Dans les machines de *Lebrun* (4) et d'*Osenbruck* (5) les pistons, les bielles et l'arbre moteur sont enfermés dans une enveloppe d'huile.

M. *Fixary* a donné, de cette question (fig. 90), une solution générale beaucoup plus simple, qui consiste à entourer la gaîne d'huile du stuffing-box d'une dérivation du gaz ammoniac détendu suffisante pour la congeler en partie : l'huile forme alors autour de la tige du piston un *joint pâteux*, absolument imperméable et sans frottement; on donne en outre à ce joint, dans les compresseurs horizontaux, une longueur un peu plus grande que celle de la course du piston, de manière que les parties de la tige qui pénètrent dans le compresseur ne voient jamais l'atmosphère.

Pistons. — Les pistons sont presque toujours pourvus d'une garniture à plusieurs segments analogues à ceux des machines à vapeur. Dans la plupart des machines verticales, les pistons sont surmontés d'une couche d'huile sans cesse

1. Brevet anglais 15475 de 1884.
2. Péclet, *La Chaleur*, t. III, p. 158.
3. Brevet anglais 3964 de 1887.
4. *Gazette du Brasseur*, 19 février 1888.
5. Schwartz, *Eismaschinen*, p. 340.

renouvelés qui, pénétrant en partie sous la soupape de refoulement, supprime les espaces nuisibles en même temps qu'elle lubrifie le cylindre. et concourt à l'étanchéité du piston. Dans les machines de *Lavergne*, cette couche d'huile, introduite au-dessus du piston par la soupape d'aspiration, est (fig. 91) très épaisse, et les segments ne sont pas tout à fait étanches, de manière que la majeure partie de

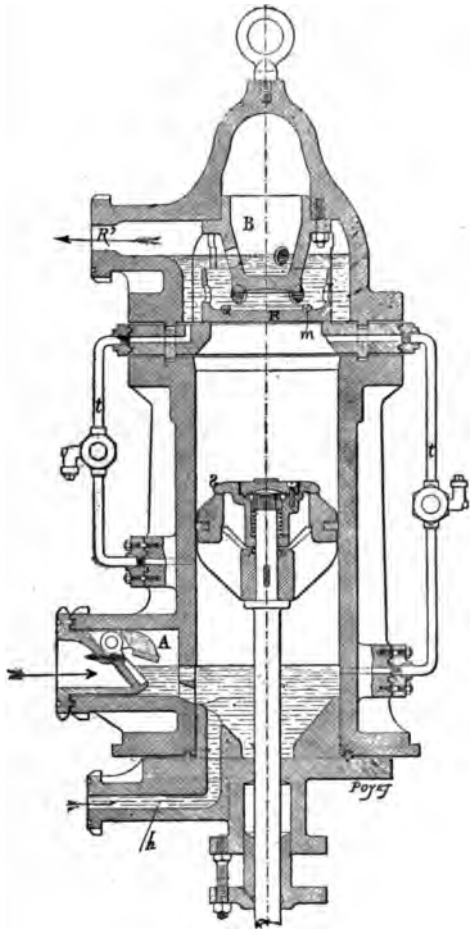


Fig. 91. — *Compresseur Lavergne*

Légende. — L'ammoniac aspiré par A au travers du bain d'huile, alimenté par *h* passe, au retour du piston, dans le haut du compresseur, en même temps qu'une partie notable de l'huile, au travers de la soupape S du piston. Quand le piston remonte, il refoule l'ammoniac et une partie de l'huile au travers de la soupape R par le tuyau de refoulement R', qui aboutit au condenseur. La majorité de l'huile qui passe au-dessus du piston, au bas de sa course, s'écoule pendant sa montée entre les segments de sa garniture et les parois du cylindre, de manière qu'il ne touche la soupape R que par une couche d'huile peu épaisse, supprimant complètement l'espace nuisible et renouvelée chaque fois. La soupape de refoulement R, unique et sans autre ressort que l'ammoniac comprimé en B, occupe tout le fond du cylindre et baigne dans de l'huile dont la résistance à l'étranglement entre les bas de B et l'anneau *m* amortit les chocs de la levée. — *tt*, purgeurs.

l'huile s'écoule, pendant la montée du piston, entre sa garniture et les parois du cylindre : le restant passe, par la soupape de refoulement, dans la circulation de graissage. On réalise ainsi un piston parfaitement étanche, à frottement réduit, et dont la garniture d'huile absorbe, comme le joint pâteux de *Fixary*, une partie de la chaleur de compression. On peut employer avantageusement, pour les hautes pressions surtout, des pistons liquides analogues à ceux des compresseurs *Sommeiller* ; on retrouve cette solution dans certaines machines horizontales

de *Kilbourn* (1), et dans les machines à acide carbonique de *Windhausen* (2). Dans ces derniers appareils, comme dans ceux de *Gamgee* (3), la compression se fait en deux fois. Commencée par une face sèche du piston, elle s'achève, au retour, par une masse d'eau glycérinée, que la face arrière de ce piston refoule jusqu'aux soupapes d'évacuation, et dont une partie forme la garniture hydraulique du stuffing-box. C'est une solution ingénieuse des liquéfactions à haute pression. M. *Raydt* a préféré employer un piston plongeur très long, rafraîchi intérieurement par une circulation d'eau (4). Nous citerons, comme cas extrême de ce genre, le compresseur *Beyligh* (5), dont le piston est constitué par une masse de mercure, et celui de *Mac Millan*, où la compression s'opère graduellement par le refoulement d'eau glycérinée dans un long cylindre en tôle (6). On peut affirmer, tout en reconnaissant l'ingéniosité de quelques-unes de ces solutions, qu'elles ne sont pas nécessaires avec les pressions modérées correspondant à la liquéfaction de l'ammoniac par exemple, pressions que soutiennent parfaitement, dans les machines horizontales à double effet, les garnitures ordinaires à segments.

Refroidissement. — Bien qu'il soit possible, ainsi que paraissent le démonmontrer de nombreux diagrammes pris notamment sur des machines *Linde* (7), de conserver le régime de saturation rien que par une enveloppe d'eau, plusieurs inventeurs, entre-autres MM. *Wood* (8) et *Puplett* (9), ont appliqué avec succès, comme moyen de refroissement, l'injection d'une certaine quantité de gaz liquéfié pulvérisé dans le compresseur. Dans la machine de *Wood*, le gaz aspiré du réfrigérant à la pompe rencontre à angle droit un petit jet d'ammoniac liquide pulvérisé au-dessus de la soupape d'aspiration. Dans la machine de *Puplett*, c'est au moyen d'un petit tiroir que l'on injecte, au commencement de la compression du gaz liquéfié du condenseur au compresseur. Nous ne savons pas si l'on a essayé ce mode de refroidissement sur les machines à acide carbonique, et nous manquons d'expériences comparatives pour en apprécier l'effet. Dans la machine *Fixary*, le joint congelé contribue à refroidir le compresseur, comme le bain d'huile des machines *Lavergne*, le piston liquide de *Windhausen* et le plongeur à circulation d'eau de *Raydt*; et l'application de ces divers moyens paraît parfaitement suffisante.

Espaces nuisibles. — Nous avons vu comment on peut supprimer complète-

1. Brevet anglais 2356 de 1879.
2. Brevets anglais 2548, 2549 de 1888.
3. Brevet anglais 4065 de 1877.
4. id. 15475 de 1884.
5. id. 3062 de 1863.
6. id. 3333 de 1881.
7. *The Engineer*. 11 fév. 1887, p. 107.
8. Brevets anglais 5798 de 1882, 9547 de 1886.
9. Brevet anglais 12543 de 1884.

ment les espaces nuisibles au moyen de pistons liquides ou chargés d'huile convenablement renouvelée : ce moyen, spécialement applicable aux machines à simple effet verticales, est le plus employé ; mais on peut aussi, en donnant aux pistons une forme sphérique épousant celle des fonds des cylindres, arriver à réduire à presque rien les espaces nuisibles dans les machines horizontales. Le plongeur de *Raydt* vient buter à fond de course sur la soupape de refoulement, qui occupe presque tout l'arrière du cylindre horizontal. Nous ne citerons que pour mémoire la solution proposée par M. *Blée* (1), qui consiste essentiellement à donner à la crosse une course plus longue que celle du piston qui lui est relié par un ressort.

Condenseur ou liquéfacteur. — Les condenseurs sont constitués, en général ,par des faisceaux de tubes droits ou des serpentins traversés par le gaz à liquéfier et entourés par l'eau de refroidissement ou de circulation. Les tubes sont en cuivre ou en fer pour les machines à éther et à acide sulfureux, en fer ou en acier pour le gaz ammoniac et l'acide carbonique.

Les serpentins doivent être multiples et disposés de façon que l'avarie de l'un d'eux ne puisse entraîner l'arrêt de la machine pendant longtemps : les tubes droits réalisent au plus haut degré ce désiratum, mais ils exigent aux plaques tubulaires de nombreux joints analogues à ceux des condenseurs à surfaces, et qui tiennent difficilement des hautes pressions. Avec les serpentins, le nombre de ces joints est très réduit. M. *Kilbourn* les rend absolument étanches en serrant (fig. 92) les bouts des tubes rabattus au moyen d'un écrou vissé dans un trou fraisé de la plaque du condenseur, sur lequel on applique ensuite une soudure à l'étain (2) maintenue elle-même par une gorge venue dans la plaque tout autour du tube et de son écrou.

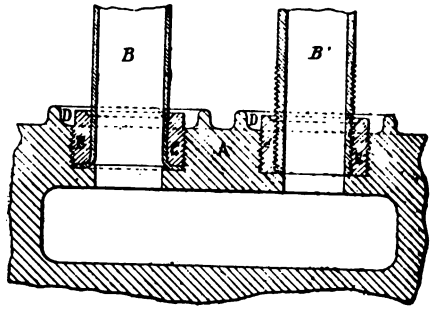


Fig. 92. — *Joints des serpentins de Kilbourn.*

Légende. — B, bout de tube rabattu, serré par un écrou C au fond d'un trou E, fraisé dans la plaque A, recouvert en D d'une soudure à l'étain. B', serrage analogue sans rabattement.

Les tubes du condenseur de M. *Puplett* sont en U, libres de se dilater sans contrainte, et divisés en deux groupes, dont le premier reçoit à l'intérieur des tubes l'ammoniac du compresseur, tandis que le second groupe reçoit ce même ammoniac autour des tubes parcourus par l'eau de refroidissement, qui circule en sens inverse (3).

1. Brevet anglais 3005 de 1861.
2. id. 5070 de 1882.
3. id. 12541 de 1884.

M. *Pictet* a proposé l'emploi d'une série de serpentins plats verticaux, débouchant chacun dans deux tubes maîtres horizontaux, sur lesquels ils sont emmanchés par des joints faciles à surveiller, et où les gaz circulent méthodiquement (1); le grand volume des tubes collecteurs faciliterait, d'après M. Pictet, la liquéfaction des gaz. M. *Quiri* a proposé aussi, pour sa machine à liquides hétérogènes, un condenseur à tubes en U (2). Le condenseur de M. *Wood* est formé d'un certain nombre de serpentins reliés au compresseur par un distributeur dont on peut les isoler séparément en cas d'avaries à l'un d'eux (3). Ces serpentins, plus accessibles et plus actifs que les condenseurs immergés, ne sont pas plongés dans une circulation d'eau, mais exposés à l'air libre à une mince chute d'eau, comme les appareils bien connus de *Baudelot*. C'est un mode de refroidissement que l'on emploie volontiers aux États-Unis; on le retrouve dans les machines de *Lavergne* (4) combiné parfois avec l'addition d'un condenseur auxiliaire refroidi par le retour de l'ammoniac gazeux détendu autour de ces tubes (5).

Cette utilisation du froid des gaz dans des condenseurs auxiliaires n'a pas grande raison d'être avec l'ammoniac, dont les pressions n'ont rien d'excessif, mais il n'en est pas de même avec l'acide carbonique. Aussi M. *Raydt* a-t-il, à notre avis, bien fait d'entourer le liquéfacteur de sa machine d'un bain refroidi par le retour de l'acide carbonique à l'aspiration du compresseur (6).

Une solution analogue consiste, comme le fait M. *Puplett*, à plonger les tuyaux du condenseur dans le bain du bac à glace (7). Dans aucun cas, l'on n'augmente le rendement de la machine, mais on diminue la fatigue du compresseur.

On a souvent proposé d'activer l'action des condenseurs en faisant traverser au gaz un espace annulaire entre des tubes noyés dans une circulation d'eau, ou en contrariant sa marche par une série de chicanes multipliant les surfaces refroidissantes, comme dans les machines à éther de *Harrison* (8) et dans certaines machines à ammoniac de *Wood* (9), mais ces dispositions entraînent d'ordinaire à des complications et à des difficultés d'entretien hors de proportion avec leur utilité spéciale — notamment en ce qui concerne les fuites.

Le mode de refroidissement du condenseur le plus employé consiste, comme nous l'avons vu, en une circulation ou en une aspersion d'eau; c'est d'ailleurs le plus simple et le plus efficace; aussi me bornerai-je à signaler seulement deux

1. Brevet anglais 16558 de 1884.
2. id. 14606 de 1886.
3. id. 9547 de 1886.
4. *Revue industrielle* 28 juillet 1888.
5. Brevet anglais 4352 de 1880.
6. id. 15475 de 1884.
7. id. 14378 de 1887.
8. id. 383 de 1871.
9. id. 5798 de 1882.

procédés particuliers proposés par MM. *Beylihg* (1) et *Ballantine* (2). Les tubes du condenseur de M. Beylihg sont refroidis par la vaporisation que provoque l'action d'un courant d'air lancé par un ventilateur sur des canevas mouillés qui entourent les tubes. Dans le condenseur de Ballantine, on fait agir la vaporisation d'eau pulvérisée par un certain nombre d'injecteurs à air comprimé.

Dans certaines machines à éther, comme celle de *Harrison*, on peut activer la condensation par un jet d'éther refroidi agissant comme l'eau d'un condenseur à injection; mais ce mode de condensation ne présente aucun avantage.

Enfin, lorsque l'on ne dispose que d'une quantité limitée d'eau pour la condensation, on peut employer presque toujours la même eau, en la refroidissant par son passage en pluie dans un courant d'air; on ne perd ainsi que l'eau vaporisée par ce courant d'air. M. *Richmond* a proposé un vaporisateur-refroidisseur de ce genre bien étudié et susceptible de rendre service dans cas (3).

Détenteur. — Dans la plupart des machines à gaz liquéfiés, le détenteur consiste en un simple robinet à pointe graduée, interposé entre le condenseur et le réfrigérant, le plus près possible du réfrigérant. On peut rendre la manœuvre de ce robinet automatique en le commandant, comme l'a proposé M. *Wood* (5), par un mécanisme servo-moteur fonction de la pression du réfrigérant; mais c'est une grande complication pour peu de chose. Avec l'acide carbonique, qui comporte une grande différence de pression entre le condenseur et le réfrigérant, une soupape différentielle suffit, comme l'a proposé M. *Windhausen* (5), ou mieux encore, ainsi que cet inventeur le fait pour ses nouvelles machines (6), l'interposition, entre le condenseur et le réfrigérant, d'un cylindre détenteur, dont le travail de détente est restitué au compresseur, comme dans les machines à air. Dans les machines à éther, on a parfois employé avec succès, comme organe de détente automatique, une soupape flottante ouvrant le détenteur dès que le niveau de l'éther atteint une certaine hauteur au bas du condenseur (7).

Robinetterie, tuyauterie. — La robinetterie des machines à compression doit être très soignée; celle des machines à gaz ammoniac, qui exclut l'emploi du laiton et du bronze, doit être exécutée en fonte de premier choix ou en fer et en acier. Parmi les solutions proposées pour assurer l'étanchéité parfaite de robinets, je citerai (fig. 93) les robinets à garnitures d'huile de *Wood* (8) et à

1. Brevet anglais 3062 de 1864.
2. id. 3121 de 1880.
3. id. 5798 de 1882.
4. *Ibid.* 5789 de 1882.
5. *Ibid.* 2864 de 1886.
6. *Ibid.* 2549 de 1888.
7. Harrison, Brevet anglais 747 de 1856.
8. Brevet anglais 9547 de 1886 et *Chapman*. Brevet anglais 11915 de 1888.

clefs calées de *Kilbourn* (1) dont le boisseau est forcé par un contre-écrou qu'il faut desserrer pour ouvrir le robinet.

La tuyauterie doit être aussi de première qualité, en cuivre étiré pour certains gaz, en fer ou en acier pour l'ammoniac ; on doit éviter les coudes brusques Comme joints, on peut citer ceux de *Kilbourn*, à double écrou et manchon serrés sur plomb, et ceux de *Lavergne*, à manchon soudé (2) ou à brides vissées, soudées et serrées sur le plomb.

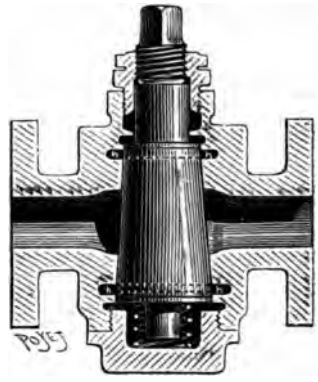


Fig. 93. — Robinet Wood avec garniture d'huile en *h h*.

Graissage. — Le graissage se fait, pour l'ammoniac et l'acide carbonique, par une circulation d'huile minérale, presque toujours automatique. On sépare l'huile du gaz refoulé avec elle au moyen d'un égoutteur analogue aux sécheurs des chaudières à vapeur (appareils *Kilbourn* (3), *Wood* (4), *Fixary*). Dans quelques machines *Lavergne* (5) l'huile est séparée de l'ammoniac au sortir du compresseur par un chauffage qui en dégage les gaz dissous, puis refroidie et passée dans un second séparateur à chicanes avant de revenir au compresseur.

Réfrigérant. — Le réfrigérant est comme la contre-partie, la réciproque du compresseur. Le plus souvent, il se borne à refroidir un liquide incongelable convenablement agité autour des tubes ou des serpentins dans lesquels se détend le gaz liquéfié ; mais les formes du réfrigérent varient considérablement suivant le but qu'il doit remplir, ou suivant ses adaptations, que nous étudierons en parlant des applications des machines frigorifiques. Les tubes et les serpentins du réfrigérent se prêtent, pour les mêmes raisons, aux mêmes spécialisations que ceux des condenseurs. On y retrouve, comme aux condenseurs, les tubes soit droits, soit en U greffés sur deux collecteurs supérieurs (*Pictet*) (6), et les serpentins sectionnés (*Wood*) (7) ou annulaires (*Harrison*) (8). La méthode la plus pratique consiste, pour les grands réfrigérants surtout, à constituer les serpentins par une série de longs tubes droits, reliés par des coudes à brides. L'agitation du liquide à refroidir est produite le plus souvent par des turbines placées au fond du bac, à l'un des bouts du réfrigérant. Les tubes en cuivre, en

1. Brevet anglais 5070 de 1882.
2. *Revue Industrielle*, 28 juillet 1888.
3. *Engineering*, 20 octobre 1882.
4. Brevet anglais 9547 de 1886.
5. *Ibid.* 14095 de 1887.
6. *Ibid.* 12631 de 1887.
7. *Ibid.* 5798 de 1882.
8. *Ibid.* 383 de 1874.

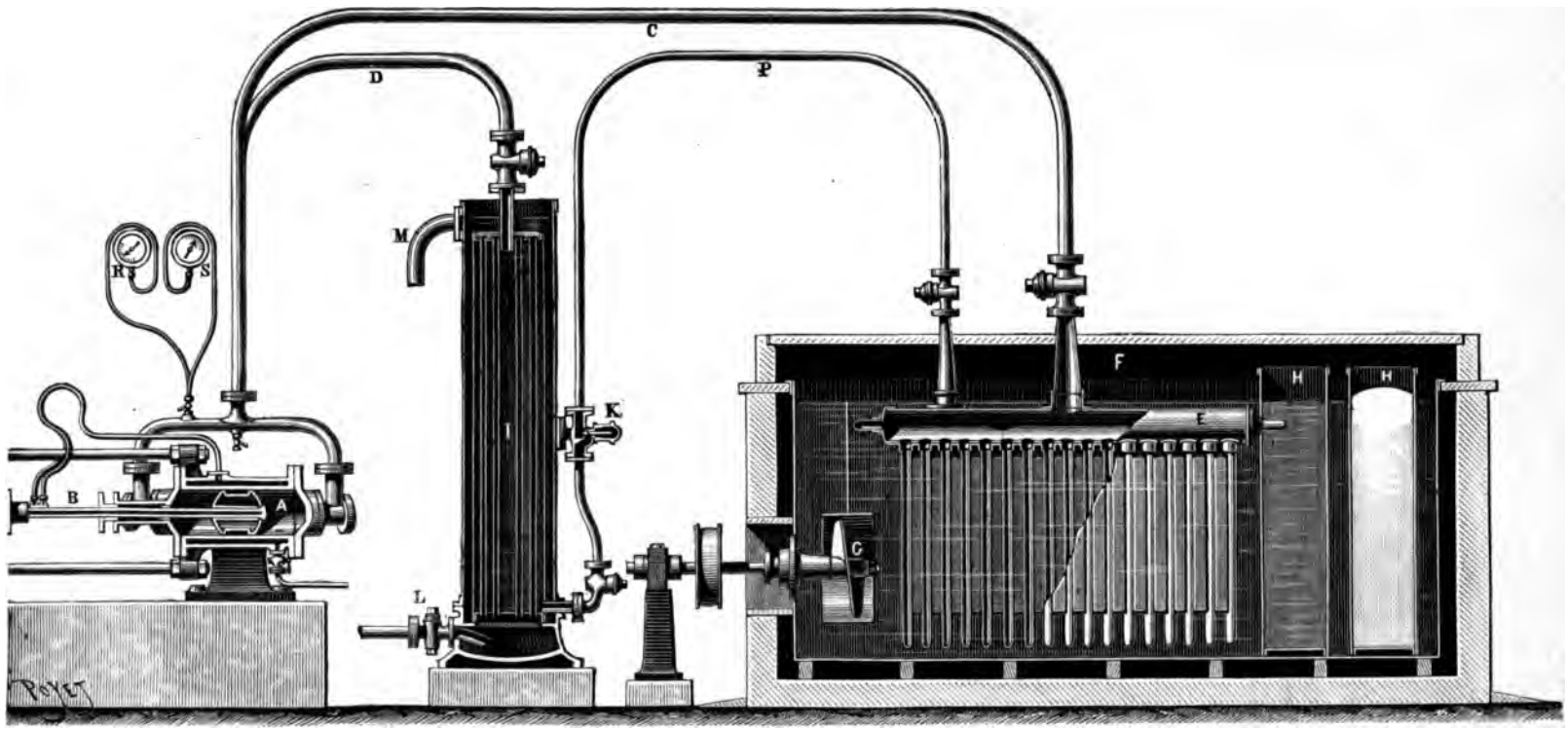


Fig. 98. — Vue en coupe de la machine Pictet.

A pompe de compression.
B piston compresseur.
C Tuyaux d'aspiration de l'anhydride gazeux.
D Tuyaux de refoulement de l'anhydride gazeux.
E Réfrigérant *incongelable nouveau système.*
F cuve de congélation.
G Hélice pour agiter le bain incongelable.
H moule à glace.
I Condenseur vertical *nouveau système.*
K robinet de réglage.
L robinet d'arrivée de l'eau de condensation.
M sortie de l'eau de condensation.
P tuyau de retour d'anhydride liquide.
R manomètre d'aspiration.
S manomètre de compression.

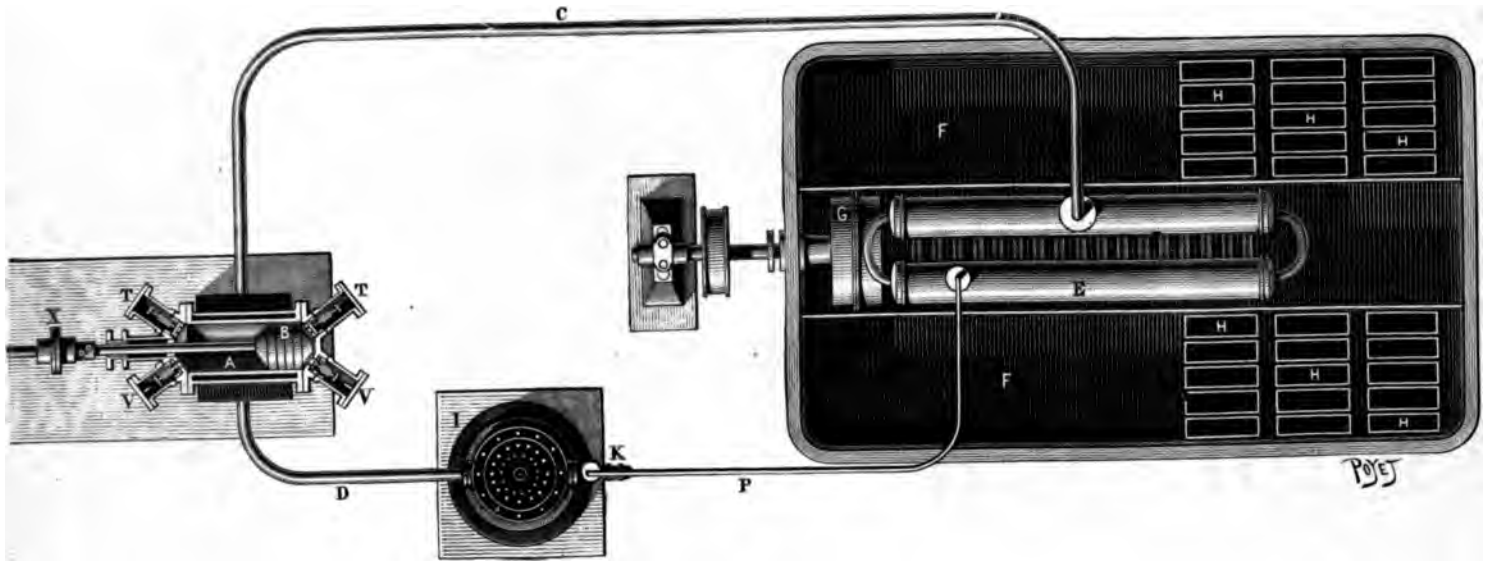


Fig. 99. — Plan de la machine Pictet.
T, soupape d'aspiration, V, soupape de compression, X, jonction du piston du moteur avec le piston compresseur.

« Cette disposition établit pour les manchettes une étanchéité parfaite et une solidité à toute épreuve. Les tubes en U peuvent se mettre facilement en place et s'enlever sans que les soudures voisines en souffrent.

« Pour agrandir la surface émissive sans augmenter le volume intérieur de l'appareil, on a joint les tubes communiquants entre eux, dans leurs parties droites, par des bandes en cuivre qui, soigneusement soudées, font corps avec eux et permettent la transmission du calorique au même degré que les tubes eux-mêmes.

« Ce mode de construction et cette disposition ont l'avantage considérable d'éviter la rupture des tubes du réfrigérant par la congélation, dans le cas où l'agitation du liquide incongelable viendrait à s'arrêter pour une cause quelconque. En outre, l'émission des vapeurs du liquide volatil se produisant plus facilement, il y a une certaine diminution dans la force motrice employée pour l'aspiration. Enfin, le niveau du liquide volatil peut s'abaisser dans le réfrigérant d'une quantité assez considérable, sans que le rendement de l'appareil soit diminué d'une manière sensible.

« Afin d'utiliser le froid produit par l'évaporation de l'acide sulfureux, on a disposé le réfrigérant au milieu d'une grande cuve rectangulaire. Une circulation très active d'eau, contenant un dissolution du chlorure de magnésium, est entretenue, d'une manière continue, par le jeu d'une hélice située à une des extrémités du réfrigérant.

« Deux parois verticales et étanches obligent le courant d'eau salée produit par la rotation de l'hélice à passer dans l'intérieur des tubes et autour de la surface du réfrigérant. Des ouvertures ménagées à chaque extrémité de ces parois permettent à l'eau de passer dans l'intérieur du réfrigérant et de sortir derrière l'hélice, pour circuler autour des mouleaux placés régulièrement dans l'intérieur de la cuve.

« On a prêté aussi une attention toute particulière à la pompe, dont le jeu consiste à comprimer les vapeurs soustraites au réfrigérant, et à les liquéfier dans le condenseur. C'est à la permanence de son bon perfectionnement qu'est due la permanence de la production constante de la glace.

« Le corps de la pompe est un cylindre à double enveloppe, dont les dimensions sont proportionnelles au type. Le piston en fonte est ajusté soigneusement et rodé dans l'intérieur de ce cylindre. Ce piston présente une grande surface de contact avec les parois intérieures du cylindre, et, afin d'assurer une herméticité aussi parfaite que possible, il porte une série de rainures parallèles, en forme de canelures ; il est muni en outre de deux segments d'acier ou de fonte. Les cannelures servent surtout à augmenter l'effet produit par la détente successive des gaz qui s'écoulent d'une cannelure à l'autre par des orifices annulaires très petits.

« Les clapets ont été longuement étudiés, et leur construction spéciale est le

résultat d'une expérience de plusieurs années. Ces organes délicats, dont le fonctionnnement constant est une condition indispensable de bon rendement, seraient susceptibles de mille accidents si on les construisait d'après les types

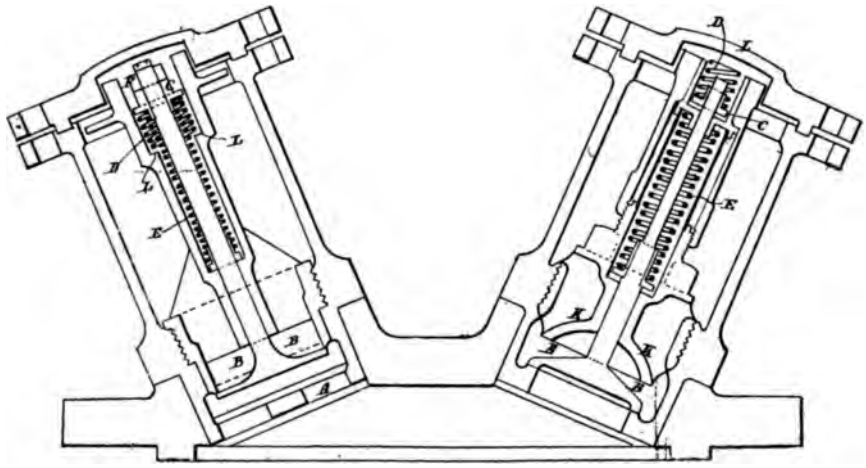


Fig. 100. — *Pictet* (1884). *Soupapes de refoulement et d'aspiration.*
B, soupape d'aspiration, E ressort ordinaire sur lequel appuie l'écrou C, D ressort dur qui vient, en appuyant sur L, dès que la soupape s'est ouverte de 7 à 8 m/m, amortir les chocs et accélèrer le rappel. A barrette de sûreté empêchant la soupape de tomber dans le compresseur en cas de rupture de la tige ou de desserrage des écrous FC, B' soupape de refoulement avec garde de sûreté R, ressort ordinaire E et ressort de rappel dur C, amortissant les chocs par sa butée sur L. En marche normale, les soupapes ne doivent pas toucher les gardes A et K.

usités ordinairement dans l'industrie. Leurs caractères distinctifs sont les suivants (fig. 99) :

« Le corps du clapet est en acier. La tige est assez épaisse et le disque résistant.

« Le guidage est aussi long que le comporte la chapelle extérieure du cylindre, espèce de boîte en bronze qui protège tout le mécanisme des clapets.

« Le ressort qui agit sur la tige du clapet est très long ; il est au moins vingt fois plus long que sa course.

« Le ressort de l'aspiration est faible ; la pression qu'il exerce au repos est au plus de $\frac{1}{20}$ d'atmosphère sur la surface du disque obturateur.

« Le siège du clapet d'aspiration fait corps avec le guide et entre à vis dans sa boîte.

« Le siège est d'abord tourné, puis rodé au moyen du clapet lui-même.

« La fermeture est ainsi garantie. Aucun gauche n'est à redouter.

« Le clapet est arrêté dans sa course par un croisillon, qui sert aussi à l'em-

« Cette disposition établit pour les manchettes une étanchéité parfaite et une solidité à toute épreuve. Les tubes en U peuvent se mettre facilement en place et s'enlever sans que les soudures voisines en souffrent.

« Pour agrandir la surface émissive sans augmenter le volume intérieur de l'appareil, on a joint les tubes communiquants entre eux, dans leurs parties droites, par des bandes en cuivre qui, soigneusement soudées, font corps avec eux et permettent la transmission du calorique au même degré que les tubes eux-mêmes.

« Ce mode de construction et cette disposition ont l'avantage considérable d'éviter la rupture des tubes du réfrigérant par la congelation, dans le cas où l'agitation du liquide incongelable viendrait à s'arrêter pour une cause quelconque. En outre, l'émission des vapeurs du liquide volatil se produisant plus facilement, il y a une certaine diminution dans la force motrice employée pour l'aspiration. Enfin, le niveau du liquide volatil peut s'abaisser dans le réfrigérant d'une quantité assez considérable, sans que le rendement de l'appareil soit diminué d'une manière sensible.

« Afin d'utiliser le froid produit par l'évaporation de l'acide sulfureux, on a disposé le réfrigérant au milieu d'une grande cuve rectangulaire. Une circulation très active d'eau, contenant un dissolution du chlorure de magnésium, est entretenue, d'une manière continue, par le jeu d'une hélice située à une des extrémités du réfrigérant.

« Deux parois verticales et étanches obligent le courant d'eau salée produit par la rotation de l'hélice à passer dans l'intérieur des tubes et autour de la surface du réfrigérant. Des ouvertures ménagées à chaque extrémité de ces parois permettent à l'eau de passer dans l'intérieur du réfrigérant et de sortir derrière l'hélice, pour circuler autour des mouleaux placés régulièrement dans l'intérieur de la cuve.

« On a prêté aussi une attention toute particulière à la pompe, dont le jeu consiste à comprimer les vapeurs soustraites au réfrigérant, et à les liquéfier dans le condenseur. C'est à la permanence de son bon perfectionnement qu'est due la permanence de la production constante de la glace.

« Le corps de la pompe est un cylindre à double enveloppe, dont les dimensions sont proportionnelles au type. Le piston en fonte est ajusté soigneusement et rodé dans l'intérieur de ce cylindre. Ce piston présente une grande surface de contact avec les parois intérieures du cylindre, et, afin d'assurer une herméticité aussi parfaite que possible, il porte une série de rainures parallèles, en forme de cannelures ; il est muni en outre de deux segments d'acier ou de fonte. Les cannelures servent surtout à augmenter l'effet produit par la détente successive des gaz qui s'écoulent d'une cannelure à l'autre par des orifices annulaires très petits.

« Les clapets ont été longuement étudiés, et leur construction spéciale est le

résultat d'une expérience de plusieurs années. Ces organes délicats, dont le fonctionnnement constant est une condition indispensable de bon rendement, seraient susceptibles de mille accidents si on les construisait d'après les types

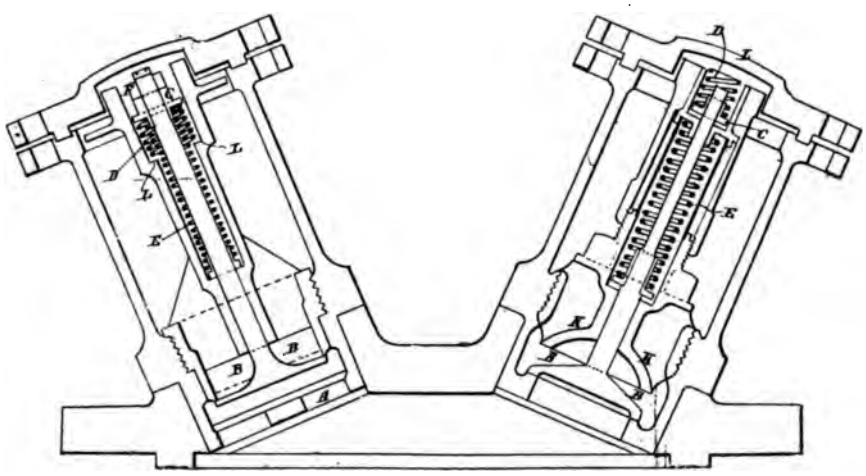


Fig. 100. — *Pictet* (1884). *Soupapes de refoulement et d'aspiration.*
B, soupape d'aspiration, E ressort ordinaire sur lequel appuie l'écrou C, D ressort dur qui vient, en appuyant sur L, dès que la soupape s'est ouverte de 7 à 8 m/m, amortir les chocs et accélérer le rappel. A barrette de sûreté empêchant la soupape de tomber dans le compresseur en cas de rupture de la tige ou de desserrage des écrous FC, B' soupape de refoulement avec garde de sûreté R, ressort ordinaire E et ressort de rappel dur C, amortissant les chocs par sa butée sur L. En marche normale, les soupapes ne doivent pas toucher les gardes A et K.

usités ordinairement dans l'industrie. Leurs caractères distinctifs sont les suivants (fig. 99) :

« Le corps du clapet est en acier. La tige est assez épaisse et le disque résistant.

« Le guidage est aussi long que le comporte la chapelle extérieure du cylindre, espèce de boîte en bronze qui protège tout le mécanisme des clapets.

« Le ressort qui agit sur la tige du clapet est très long ; il est au moins vingt fois plus long que sa course.

« Le ressort de l'aspiration est faible ; la pression qu'il exerce au repos est au plus de $\frac{1}{20}$ d'atmosphère sur la surface du disque obturateur.

« Le siège du clapet d'aspiration fait corps avec le guide et entre à vis dans sa boîte.

« Le siège est d'abord tourné, puis rodé au moyen du clapet lui-même.

« La fermeture est ainsi garantie. Aucun gauche n'est à redouter.

« Le clapet est arrêté dans sa course par un croisillon, qui sert aussi à l'em-

pêcher de tomber dans l'intérieur du cylindre, si par hasard il venait à se briser.

« Le ressort à boudin est logé dans l'intérieur d'une gaîne, qui en retient les fragments en cas de rupture.

« La douceur du ressort du clapet d'aspiration, c'est-à-dire la faible puissance avec laquelle il agit, est une condition de bon rendement ; car les gaz aspirés par la pompe entrent dans le cylindre d'autant plus facilement qu'ils rencontrent moins d'obstacle ; chaque coup de piston absorbe ainsi un poids de vapeur plus fort proportionnellement à la densité de cette vapeur.

« On règle la tension du ressort d'aspiration au moyen de l'écrou fixé sur la tige du clapet. Il faut opérer le serrage de telle sorte, qu'en tenant le clapet verticalement, le disque dirigé en bas, le ressort supporte justement le poids du clapet, de manière à le maintenir contre son siège.

« Il faut que la moindre pression exercée sur le haut de la tige, avec le doigt, par exemple, fasse immédiatement fléchir le ressort, et que le ressort ramène le clapet au contact aussitôt que cette pression cesse.

« Il est essentiel que le contre-écrou qui tient le ressort du clapet tendu soit solidement fixé et ne puisse s'échapper de la tige ; sans cette précaution, l'écrou pourrait se dévisser et le clapet ne plus fonctionner.

« Les clapets de refoulement sont construits sur le même principe que ceux d'aspiration et se caractérisent par les mêmes dispositiitions. Le ressort cependant, quoique très long par rapport à la course du clapet, est beaucoup plus puissant qu'à l'aspiration. Il doit agir avec une force correspondant à $\frac{1}{10}$ d'atmosphère, au minimum, sur la section de sortie des gaz.

« On règle la tension du ressort de refoulement au moyen de la gaîne en bronze qui se visse sur son guide. Il faut opérer le serrage de telle sorte qu'ayant posé le clapet verticalement sur la table, le disque en bas, le ressort supporte justement le poids du guide, de manière à le maintenir soulevé et séparé du disque du clapet. Il faut que la moindre pression exercée, avec le doigt, par exemple, sur le guide, fasse fléchir le ressort, et que le guide soit soulevé de nouveau aussitôt que cette pression cesse.

« Le *presse-étoupes* affecte dans les machines une disposition spéciale destinée à le rendre parfaitement étanche. Il est partagé en deux parties : une première garniture métallique, composée de segments à ressort, établit un premier joint entre la tige du piston et l'intérieur du cylindre; devant cette garniture métallique, se trouve un anneau évidé en fonte. Après l'anneau métallique, vient une cavité que l'on remplit de cordes talquées, à la façon d'un presse-étoupes d'une machine à vapeur ordinaire.

« La bague en fonte qui ferme l'entrée du presse-étoupes, en appuyant sur la tresse talquée, porte une cannelure sur laquelle est un anneau de caoutchouc.

Lorsque le serrage est opéré, cet anneau se comprime contre la paroi de la boîte du presse-étoupes et empêche les fuites de ce côté.

« Pendant le refoulement, les gaz qui ont passé du cylindre dans la cavité fermée par l'anneau métallique, trouvent une capacité formée par la bague évidée, dans laquelle ils se détendent, et ils retournent au cylindre pendant l'aspiration.

« Il résulte de ce dispositif que la seconde garniture est absolument étanche, pour peu qu'elle soit faite avec soin, car la pression extérieure est, à peu de chose près, semblable à la pression des gaz dans l'anneau métallique. On arrive ainsi à supprimer entièrement les fuites du seul joint mobile de la machine, le joint de la tige du piston.

Des essais exécutés en octobre 1888, par M. le professeur S. Gutermuth, à Aix-la-Chapelle, sur une machine Pictet de 1000 kilogrammes de glace à l'heure. pourvu de deux compresseurs de 320 $\times$ 900^{mm} marchant à 56 tours, avec un mélange de 97 % d'acide sulfureux et de 3 % d'acide carbonique, ont donné en moyenne les résultats suivants :

Glace brute par cheval-heure.

Glace brute par cheval-heure indiqué	au compresseur	au moteur.
1er essai.....	19 kil.	9.48
2e essai.....	27	12.95
3e essai.....	42	21
4e essai.....	23	11.96

Soit, pour l'ensemble du compresseur et de la machine à vapeur, un rendement organique moyen de 50 % environ, assez faible, et du principalement au serrage exagéré de la garniture du stuffing-box.

La production maxima : 42 kilogrammes par cheval indiqué au compresseur, a été obtenue avec un bain de — 3° $^1/_2$ et une dépense d'eau de condensation de 36^{m3} à l'heure, prise à 9°3 et sortant à 13°. Le refroidissement du compresseur exigeait, en moyenne, 450 litres d'eau par heure.

Machines de M. Vincent

Les machines de M. Vincent fonctionnent, comme nous l'avons vu au chlorure de méthyle. -- La figure 101 et sa légende suffisent pour en faire comprendre la marche générale. Le bas des compresseurs, verticaux et à simple effet, communiquent entre eux par un espace libre sans cesse en rapport avec l'aspiration,

qui est d'une atmosphère environ, de sorte que les fuites aux stuffing-box sont facilement évitées.

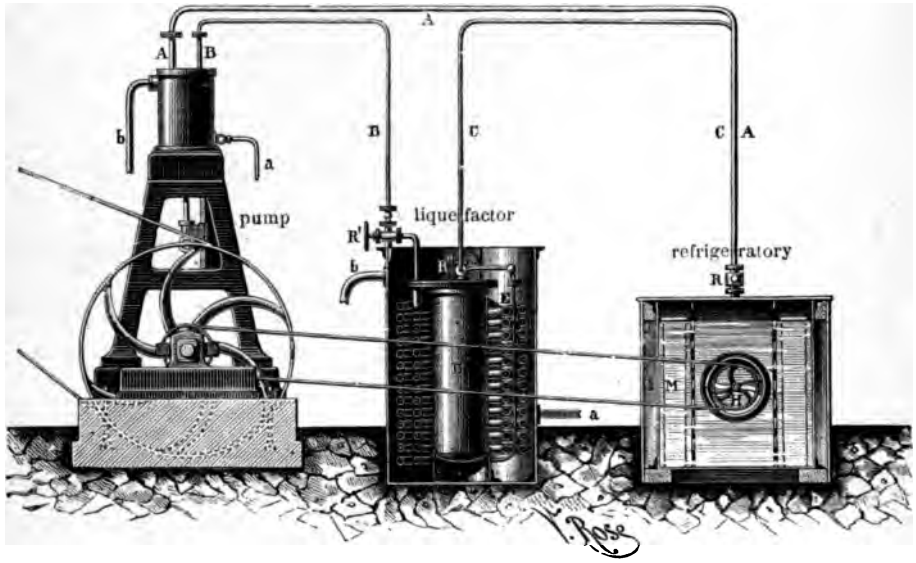


Fig. 101. — *Machine Vincent.*
A, tuyau d'aspiration du chlorure du méthyle gazeux. B, refoulement au liquéfacteur D, à serpentin E. C, tuyau amenant le chlorure liquéfié au robinet de détente R, du bac à glace I, *a'* mouleaux M. H, turbines agitatrices du bain I. R' R', robinets d'isolement *ab*, circulation d'eau du condenseur liquéfacteur D.

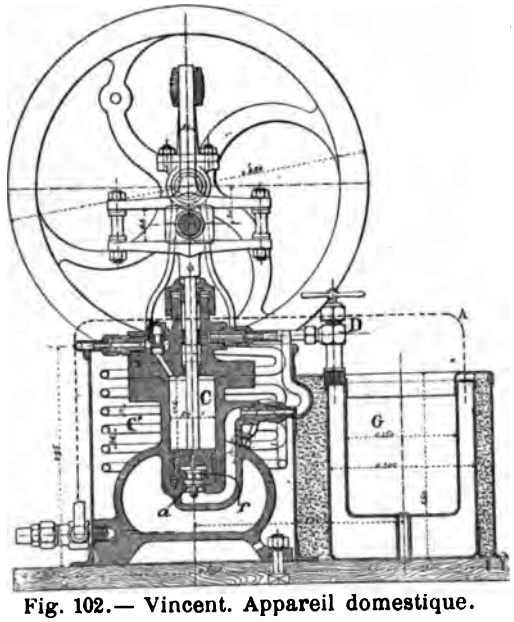


Fig. 102.— Vincent. Appareil domestique.
C, compresseur.
C', condenseur.
G, bac à glace.

Le petit appareil représenté par la fig. 102, où le compresseur baigne dans l'enveloppe même du condenseur, est destiné à produire à la main 2 à 3 kilogrammes de glace à l'heure.

Le chlorure de méthyle s'expédie tout liquifié dans des bonbonnes en tôle d'acier dont le robinet est parfaitement protégé par un couvercle

On peut citer parmi les installations de machines Vincent, celle de la raffinerie parisienne — 100,000 calories négatives fournies par quatre machines de 25,000 calories — pour le refroidissement du jus de sucrate de strontiane (1).

1. *Revue industrielle*, 26 août 1886.

MACHINES A AMMONIAC

Machines Linde

La machine de Linde est l'une des machines à ammoniac les plus anciennes et les plus répandues principalement en Allemagne, son pays d'origine.

Les figures 103 et 104 représentant un type normal d'installation Linde pour fabrication de la glace opaque. Contrairement à la pratique usuelle, le compresseur, à double effet et horizontal, n'est pas dans le prolongement de la tige du piston de la machine motrice, mais attaqué par une manivelle à 90°. On évite ainsi de

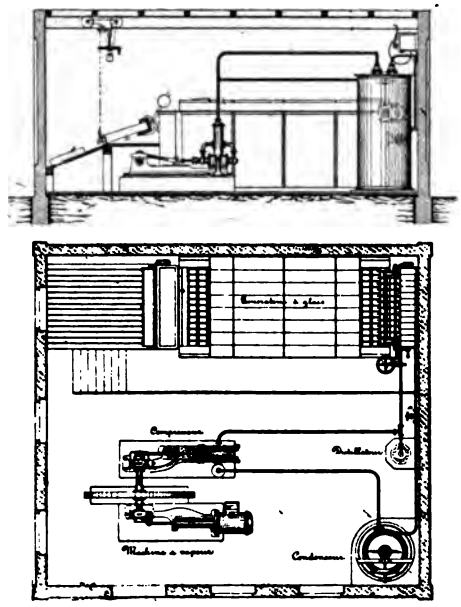


Fig. 103 et 104. — Ensemble d'une installation *Linde* pour fabrication de la glace.

faire coincider les plus hautes pressions de la vapeur sur le piston de la machine motrice avec les plus basses pressions du compresseur. Le stuffing-box est pourvu d'une garniture d'huile analogue à celle des machines de Tellier et par-

1. Brevet anglais 1458 de 1876. — Schwarz. Eismaschinen, p. 330.

faitement étanche—; l'huile entraînée passe dans un séparateur rectificateur interposé entre le condenseur et le refoulement du compresseur.

Les machines de M. Linde ont été soumises a de nombreux essais, presque toujours sous la direction de leur inventeur (1).

Un essai fait à Munich, en 1886, sur une machine à glace Linde de 1000 kilogrammes à l'heure, a donné les résultats suivants :

Production de glace à l'heure.	1750 kilog.
Chaleur utilisée à faire la glace, par heure (*c*) . .	183000 cal.
Puissance indiquée, non compris le travail de la pompe de circulation et la manutention des mouleaux (*a*).	53 chevaux.
Puissance indiquée au compresseur d'ammoniac (*b*)	30 »
Rapports . . . . . $\frac{a}{b}$	1,53
$\frac{c}{b}$	7,5
Glace par kilogramme de charbon, avec une vaporisation de 8 kilog. par kilogramme de houille .	26 kg,3

Le compresseur à double effet était actionné directement par une machine Sulzer, dépensant 9 kil. 90 de vapeur par cheval indiqué. La machine Linde produisait donc, comme la plupart des bonnes machines à ammoniac, 31 kilogrammes de glace environ par cheval indiqué au moteur, et 43 kil. 5 par cheval indiqué au compresseur : c'est ce dernier chiffre qui donne le véritable rendement (2).

La machine Linde exposée dans la section Suisse par la maison Sulzer, se distinguait par la disposition générale de son ensemble établi en vue d'une utilisation à bords des navires, et par un procédé spécial de distillation de l'eau pour la fabrication de la glace transparente, que nous décrirons dans la partie de notre travail consacrée à cette question. — Quant à l'installation même pour bateaux, nous ne pouvons mieux faire que de reproduire textuellement la description qui nous en a été communiquée par M. *Diesel*, agent de M. Linde à Paris.

« La machine exposée se distingue complètement de la machine Linde ordinaire en ce sens qu'elle est construite spécialement pour être montée sur des navires.

« On sait que les navires se sont refusés jusqu'ici à adopter les machines à gaz liquéfiés ; ils ont toujours préféré les machines à air, malgré une consommation de charbon 5 à 6 fois plus forte et un encombrement proportionné. —

1. *Schroter*. Untersuchungen an Kaltemaschinen, p. 60.
2. Lightfoot. On Refrigerating Machinery (*Inst of Mechanical. Engineers*, mai 1886, p. 218.

Cette préférence, on doit le dire, était justifiée, parce que le type marin manquait absolument pour les autres systèmes. — On ne pouvait pas, sur un bateau, monter séparément machine à vapeur, compresseur, condenseur réfrigérant et diverses pompes, et réunir entre eux ces appareils par des tuyaux; une installation de ce genre aurait certainement donné des résultats, déplorables, et on préférait, pour cette raison, la machine à air. Mais, *aujourd'hui, le type marin est créé pour la machine à compression*, c'est précisément celui qui nous occupe, et nous considérons qu'il y a là une manifestation nouvelle, de haute importance dans ce sujet de la production du froid.

« Cette machine porte sur un seul socle le moteur à vapeur et un compresseur compound, sur lequel nous reviendrons; le socle contient à l'intérieur le condenseur, très accessible, malgré cela, au moyen de grandes portes d'accès. Il porte en outre d'un côté la pompe à eau, puisant directement à la mer, de l'autre, le condenseur à vapeur. Voilà donc une installation complète, en une seule pièce, pouvant se placer n'importe où sur un navire. — Il est intéressant de citer que cette installation est arrivée toute montée des ateliers, et qu'on l'a déchargée, telle qu'elle est du wagon pour la mettre où elle était; on n'a pas eu besoin de montage sur place, sauf un tuyau pour le relier à la chambre froide. — Il est évident qu'on peut agir de même sur les navires, ce qui a son importance, au point de vue du temps à perdre pour l'aménagement d'une telle installation à leur bord. — Il faut dire aussi que cette machine a inspiré le plus grand intérêt aux capitaines de navire et aux exportateurs de viande qui ont eu l'occassion de la voir et que, dès son apparition, quatre machines de ce type ont été commandées; ce qui prouve bien, ce que nous avancions tout-à-l'heure, que la machine à air va voir son domaine diminuer de plus en plus.

« Nous parlions tout-à-l'heure du compresseur compound adopté pour cet appareil. — Nous croyons que l'application du système compound est également une innovation remarquable dans la production du froid. — Peut-être ce système a t-il déjà été proposé précédemment, mais il est certain que c'est la première fois qu'il apparaît réalisé pratiquement et couramment en grand. Nous ajoutons immédiatement que les constructeurs sont loin de vouloir remplacer d'une façon générale la compression simple par la compression en deux temps; cette dernière reste exclusivement réservée aux pays tropicaux et aux passages de l'équateur, lorsqu'on a affaire à des pressions de 15 ou 16 kilogrammes; dans ce cas, mais dans ce cas seulement, la diminution du rendement mécanique, qui est le résultat nécessaire de l'emploi de 2 cylindres, est compensée, et au-delà, par les avantages de la compression en 2 temps, savoir: diminution des effets nuisibles des fuites par clapets et pistons, et surtout diminution de l'effet des espaces nuisibles, diminution aussi des effets nuisibles dûs à la conductibilité des parois. En dehors de ces avantages, le

système compound possède celui de diminuer la pression du côté du presse-étoupes, parce que les parties avant des cylindres compriment dans un réservoir intermédiaire et la partie arrière est d'un seul cylindre, donc la partie sans presse-étoupes, donne la compression définitive au condenseur. La partie arrière du second cylindre comprime seulement dans le réservoir intermédiaire. Le fonctionnement est donc celui-ci : « sur les 2 cylindres, les 2 parties avant et une partie arrière compriment au réservoir, et la partie arrière seule du second cylindre aspire à ce réservoir et refoule au condenseur. L'adoption de ce système à bord des bateaux offre en outre l'avantage d'avoir toujours 2 compresseurs, c'est-à-dire double installation, dont une seule au besoin pourrait suffire ; on peut accoupler les presseurs au moment du chargement de la viande sur les bâteaux, et congeler cette viande à bord, au lieu de la congeler dans des installations spéciales sur terre ferme ; une fois la congélation faite, on ne marche plus qu'à un compresseur pour l'entretien de la température ; pour le passage des tropiques on peut de nouveau accoupler, et ainsi de suite. On voit que la machine ainsi combinée est un outil d'une extrême élasticité : cette élasticité augmente encore par la variation possible de la vitesse ; les clapets de Linde permettant une vitesse jusqu'à 120 tours par minute.

« Si nous avons un peu insisté sur cette machine marine à compression, c'est parce que la question des transports de viande congelées, de la conservation des aliments à bord, du refroidissement des salons de passagers etc., bref, la production du froid en mer, est une question d'une extrême importance et toute d'actualité ; c'est aussi parce que nous croyons devoir appeler l'attention des intéressés sur l'*énorme économie de charbon qu'ils peuvent faire en remplaçant l'encombrante machine à air par un bon système à compression d'ammoniac.* »

Machines de Kilbourn

Les machines de M. J.-K. Kilbourn datent de 1879 (1). — Elles sont presque toujours verticales à simple effet, avec deux compresseurs accouplés par manivelle à 180°

Les figures de la planche 3-4 représentent l'installation d'une batterie de trois machines Kilbourn dans la brasserie de MM. Meux and C° à Londres.

Les compresseurs communiquent par le bas, qui renferme un bain d'huile,

1. Brevets anglais, 2356 de 1879, 5070 de 1882, *Engineering*, 20 octobre 1882, 28 mai 1886.

et le haut des pistons est garni d'une couche d'huile qui supprime les espaces nuisibles. — Les soupapes de refoulement AA sont au nombre de deux pour chaque compresseur, en acier et recouvertes d'un chapeau qu'il suffit d'enlever pour avoir les soupapes dans la main, — elles sont en outre pourvues d'un

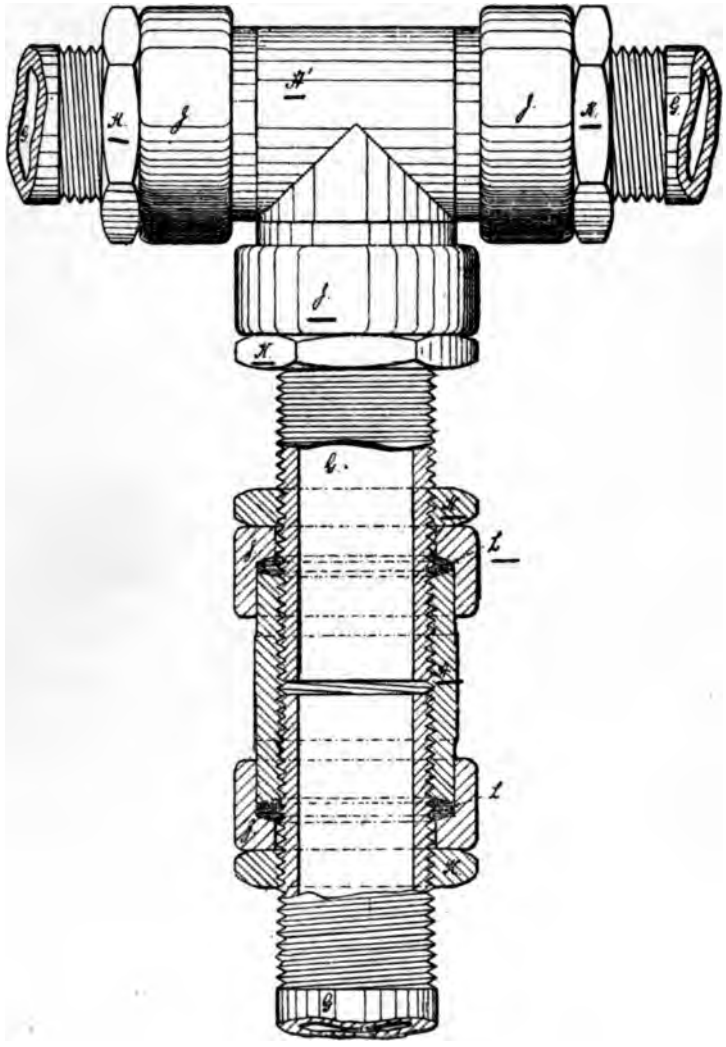


Fig. 105. — *Kilbourn*. Joints à recouvrement.

piston-guide faisant dash-pot et d'une clavette de retenue. La soupape de refoulement B, d'une construction analogue, est unique. — Les compresseurs sont entièrement baignés par une circulation d'eau.

L'ammoniac refoulé par B passe, par le tuyau F, au condenseur M, d'où il va, par H, au robinet détenteur W, qui l'admet au réfrigérant E, pour revenir par N à l'aspiration du compresseur. — Les serpentins du condenseur et du réfrigérant, divisés en deux groupes de quatre, sont essayés à 70 atmosphères: l'eau de circulation, amenée au condenseur par le tuyau principal P et le branchement QQ, en est évacuée par R ; l'eau à refroidir, amenée au réfrigérant par le même tuyau principal P et le branchement S, en sort par O'O pour être distribuée à la circulation des caves de la brasserie. Dans le condenseur et dans le réfrigérant, l'eau est agitée autour des serpentins par un agitateur M, constitué par un cylindre vertical tournant et garni d'ailettes héliçoidales.

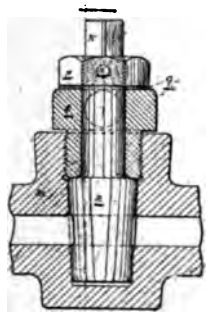


Fig. 106.— Kilbourn. Robinet à coulisse.

Nous signalerons comme détails de construction particulières aux machines de M. Kilbourn les joints des tuyaux et les robinets.

Les joints sont constitués fig. 105 par le serrage d'une bague L, recouvrant la virole de jonction A, et comprimant sur elle, par le serrage de l'écrou K, une rondelle d'amiante ou de caoutchouc L.

La fig. 106 représente le détail d'un robinet. Les différentes pièces qui le composent étant dans les positions indiquées, c'est-à-dire, l'écrou P, immobilisé par la goupille R, étant appuyé sur la rondelle *q* et la douille filetée O pressant déjà sur le haut du boisseau *n*, on donne à la douille O un coup de clef, qui serre le boisseau *n* au point d'en empêcher absolument la rotation sans avoir relâché auparavant la douille O. Ces robinets sont parfaitement étanches.

Machines de Lavergne

La machine de MM. Lavergne et Mixer, bien que de date récente (1) est l'une des plus répandues aux Etats-Unis. On évaluait en juin 1888 (2) à 7,500 tonnes de glace la puissance frigorifique journalière de l'ensemble des machines de ce système fonctionnant aux Etats-Unis.

Ainsi qu'on le voit par la fig. 107 les compresseurs des machines Lavergne, verticaux et à simple effet, sont actionnés l'un par la manivelle même de la machine motrice, et l'autre par une manivelle à 180° degrés de la première.

La circulation générale de l'ammoniac, dans la machine Lavergne, est la suivante. L'ammoniac, très chargé d'huile, passe d'abord dans un premier

1. Brevets anglais 4352 de 1880. 1114. 14095. 14440 de 1887 American Machinist 11 oct. 1884. Revue industrielle 28 juillet 1888.
2. *Engineering* 15 juin 1888.

séparateur, où elle abandonne la majorité de son huile, puis au condenseur, à surfaces extérieures non immergées, disposé comme un Beaudelot, d'où l'ammoniac liquifié tombe dans un réservoir d'ammoniac ou liquéfacteur, et, de la, dans un second séparateur d'huile, qui l'amène liquide et purifié, au robinet détendeur du réfrigérant. L'ammoniac revient du réfrigérant au compresseur au travers d'un serpentin placé au-dessus du condenseur, et destiné à refroidir l'eau de condensation, qui déroule de ce serpentin sur le condenseur.

Nous allons maintenant décrire avec quelques détails les principaux organes de la machine Lavergne.

L'ammoniac détendu revient fig. 107 et 91, du réfrigérant ou bac à glace au compresseur par le clapet d'aspiration A, au travers d'un bain d'huile très épais et sans cesse renouvelé. A la descente du piston, l'ammoniac passe en haut du compresseur au travers de la soupape de retenue J., logée dans le piston même; en outre, lorsque le piston arrive au fond de course inférieur, une partie notable de l'huile du bain passe, par cette même soupape, au-dessus du piston. A la montée du piston, pendant la période de refoulement, une partie de cette huile passe entre les parois du cylindre et les segments un peu lâches du piston; le reste passe avec l'ammoniac au travers de la soupape de refoulement dont il supprime les espaces nuisibles. La soupape de refoulement R, unique occupe tout le fond du cylindre, et n'est chargée que par la pression de l'ammoniac en B; entièrement baignée d'huile, elle est pourvue de rebords *m*, qui viennent agir, à la levée, comme un amortisseur des chocs, en laminant l'huile sur le fond de la chapelle B.

L'huile qui sort avec l'ammoniac par le tuyau de refoulement passe du premier séparateur S. (fig. 107) au refroidisseur d'huile *h*., où elle abandonne sa chaleur de compression, et d'où elle tombe, avec l'huile du second séparateur S' au réservoir *h*' d'aspiration de la pompe de concentration d'huile. Cette pompe d'injection ou de circulation d'huile est représentée en détail par les figures 108 à 111. Le cylindre mobile B, dans lequel se meut le piston A, sert de distributeur à l'intérieur d'un second cylindre fixe C, pourvu de deux lumières d'admission *aa* et de deux lumières d'échappement *bb*, par lesquelles l'huile est refoulée aux deux compresseurs. — Dans la position indiquée sur la figure 108, le piston A refoule l'huile par les lumières (*acb*) du haut de la pompe dans l'un des compresseurs, tandis que le bas de la pompe est remplie d'huile par le clapet A', la lumière inférieure *a*, et l'orifice correspondant *c*. Au retour du piston, l'orifice de inférieur *a* se ferme, par l'entraînement de B, et l'huile est refoulée de B au deuxième compresseur, par *c'b'* — Le conduit E maintient constamment les fonds D.D en équilibre de pression, et le robinet à trois voies *f* permet de purger les compresseurs en les mettant alternativement en rapport avec l'aspiration de la pompe.

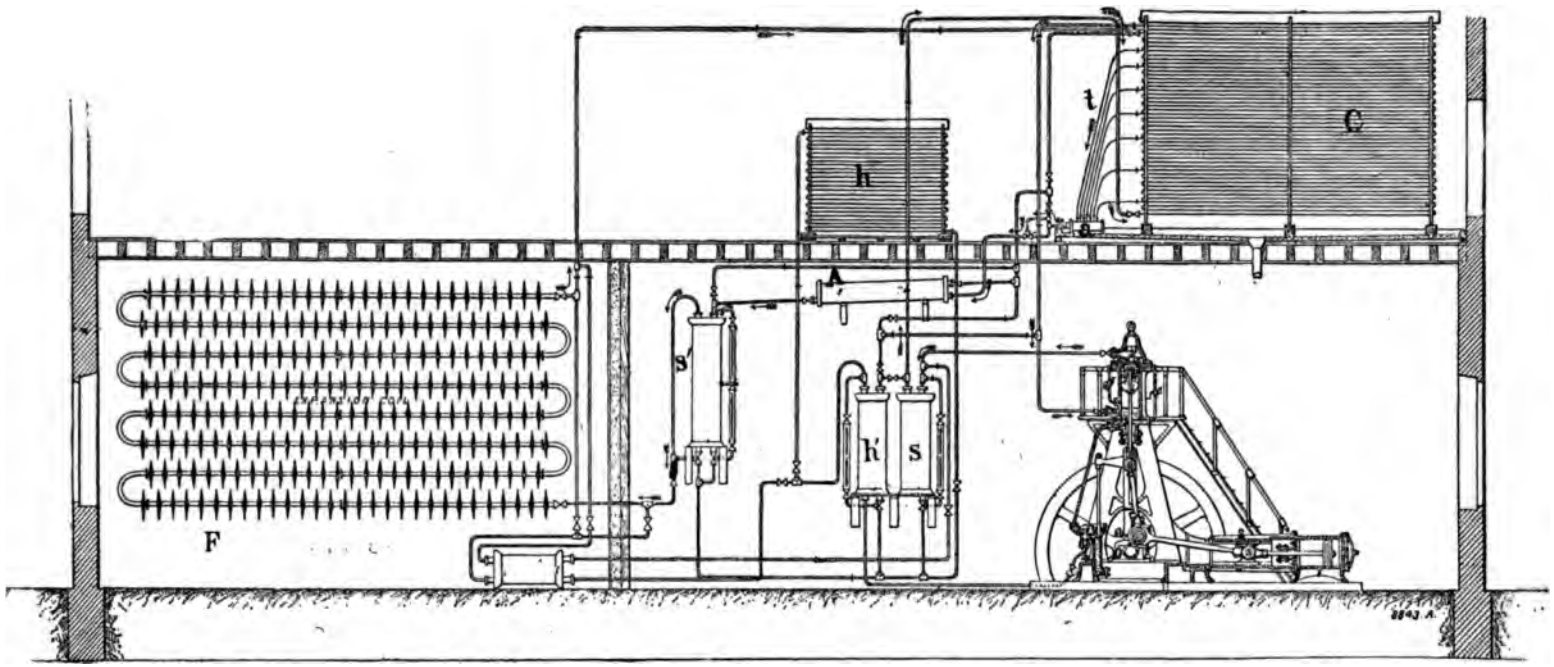


Fig. 107. — Lavergne. Ensemble d'une installation.

C, condenseur Beaudelot sectionné d'où l'ammoniac liquéfié tombe, par les tuyaux *t*, dans les liquéfacteurs *a*, A. S' où elle se sépare en même temps de ses dernières traces d'huile ramenée du réservoir *h*" à la circulation de la pompe à huile, fig. 108-111, S, séparateur d'huile, *h*, refroidisseur d'huile, *s'* séparateur d'huile, *h'* réservoir d'huile froide.

L'huile est injectée au compresseur par le tuyau *h* (fig. 91, p. 74) pendant la descente du piston, de sorte qu'elle ne diminue pas le volume de la cylindrée

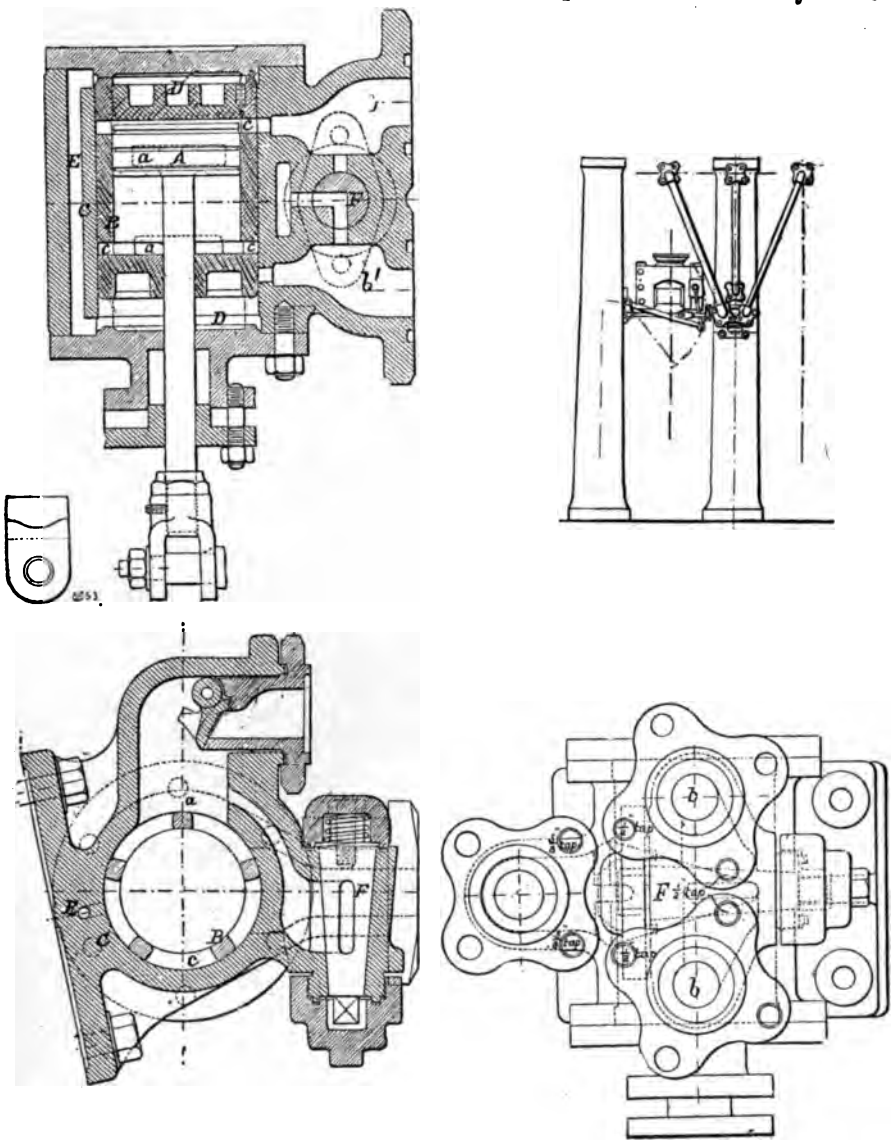


Fig. 108 à 111. — *Lavergne. Pompe de circulation d'huile.* — Montage et détail de la pompe.

B, cylindre distributeur mobile dans le cylindre fixe C, *aa*, orifices d'admission du cylindre fixe C. *cc*, orifices de refoulement du cylindre mobile B, A, piston. E communication mettant en équilibre de pression les fonds DD du cylindre mobile C, A' aspirateur de l'huile à la pompe, *bb'* refoulement aux compresseurs. F, robinet de purge des compresseurs.

d'aspiration. En raison de sa grande masse et de son renouvellement continu, cette huile absorbe peu d'ammoniac, ne mousse pas, et refroidit le compresseur en même temps qu'elle en lubrifie les organes.

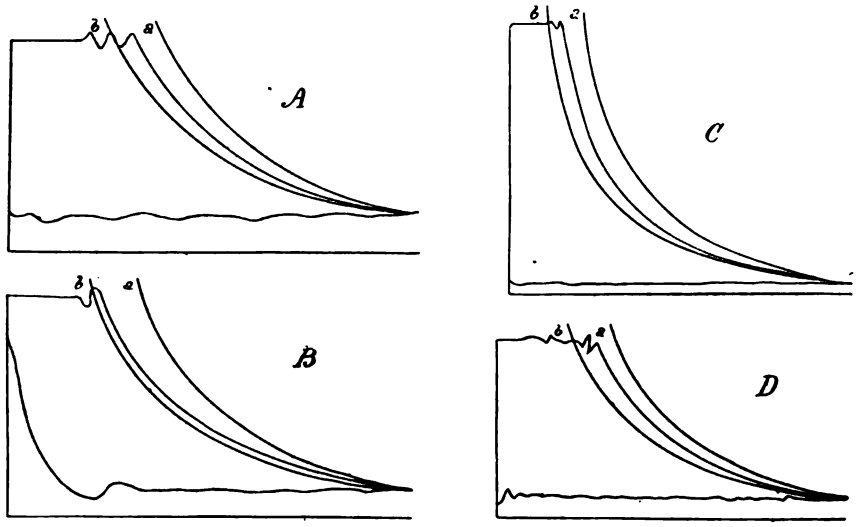


Fig. 112. — *Lavergne*. Diagrammes.

A. compresseur de 360 × 244 mill., compression 10 atm. 5, aspiration 1 atm. 9, 36 tours, travail indiqué 48 chev. *a*, adiabatique (travail, 53 chev. 6), *b*, isothermique : travail économisé par le graissage et le refroidissement du cylindre, 5 chev. 6. B, compresseur de 360 × 255 mill. non lubrifié, compression 11 atm., aspiration 1 atm. 1/3, travail indiqué 44 chev. La courbe de compression, trop rapprochée de l'isothermique *b*, indique une fuite de 15,2 0/0 pendant la compression ; on subit, en outre, à l'aspiration, une perte de 7 1/2 0/0 par la réexpansion du gaz échappé pendant la compression, soit une perte totale de 22,6 0/0 par l'absence d'huile. C, compresseur de 305 × 610 mill. : refoulement 14 atm., aspiration 0,8; travail indiqué 30 chevaux ; travail adiabatique 36 chev. 5 : bénéfice du lubrifiant 6 chev. 5. D, compresseur de 305 × 610 mill.: compression, 9 atm., aspiration 1 atm.; travail indiqué 27 chev., travail adiabatique, 31 chev. 7.

Les diagrammes, fig. 112 donnent quelques indications précises sur le fonctionnement d'un compresseur de 360 × 255 millimètres de diamètre, marchant à 36 tours par minute, avec 10 atmosphères 1/2 au refoulement et 1 atmosphère 9 à l'aspiration : puissance indiquée, 48 chevaux. La courbe réelle de compression se trouve, comme pour les machines à air, intermédiaire entre les courbes adiabatique *a* et isothermique *b*. Le travail correspondant à l'adiabatique *a* est de 53 chevaux 6, de sorte que l'on économise par le refroidissement du compresseur un travail de 5 chevaux 6. — Le travail indiqué du moteur à vapeur était de 63 chevaux, ce qui donne, pour l'ensemble de la machine, un rendement organique de 0,76.

Le condenseur est, comme nous l'avons dit, à l'air libre, et composé, comme

un Beaudelot, de plusieurs séries de tuyaux arrosés par une circulation d'eau refroidie au moyen de son passage préalable sur des serpentins parcourus par le retour de l'ammoniac du bac à glace au compresseur. L'ammoniac liquide tombe des sections du condenseur, par les tubes *t* (fig. 107), au petit collecteur *a*, qui l'amène au récipient d'ammoniac A. Ce genre de condenseur, plus accessible que les condenseurs immergés, exige un peu moins d'eau de refroidissement. — Les tuyaux du condenseur ont 50 millimètres de diamètre et sont assemblés à leur extrémité comme l'indique la figure 113.

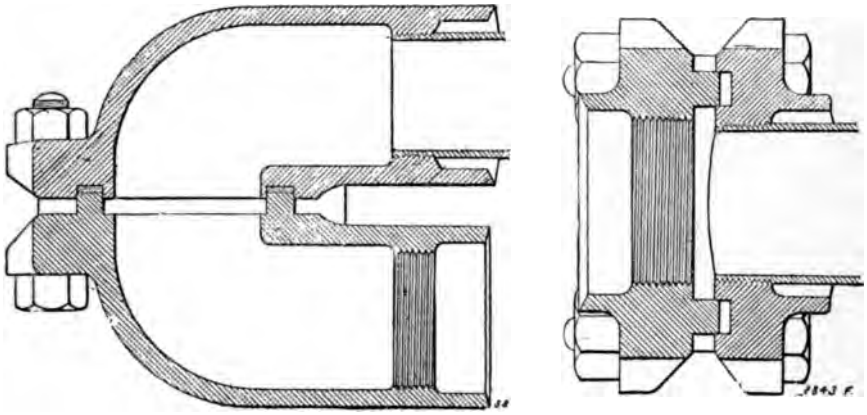


Fig. 113 et 114. — *Laveryne*. Joints au plomb.

Le robinet de détente est représenté en détail par les figures 115. Afin de permettre une graduation plus exacte de la détente, on a donné au trou de la clef une forme allongée. Les raccordements avec les tuyaux sont (fig. 113 et 114) à joints métalliques avec garnitures en rondelles de plomb écrasées.

Les dimensions des compresseurs des principaux types des machines Lavergne à deux corps de pompes et marchant à la faible vitesse de 36 tours par minute, sont les suivantes :

Dimensions des compresseurs	Force du moteur à vapeur	Production de glace en 24 heures
150 × 300 millimètres	6 chevaux	2 tonnes.
200 × 400	12	5
230 × 400	15	6,5
250 × 510	25	10
300 × 610	42	18
355 × 710	66	30
400 × 810	100	45
460 × 915	140	65

L'une des machines de Lavergne des plus impuissantes, construite pour un navire, n'a que 1m80 de haut, et produit, avec un seul compresseur de 150×300 m/m 3 tonnes de glace par jour.

Une machine Lavergne à cylindres de 915 × 460 millimètres de course, marchant à 32 tours, a donné aux essais de MM. Anderson et Page, une puissance frigorifique totale 220 000 calories négatives par heure, avec un travail de 91 che-

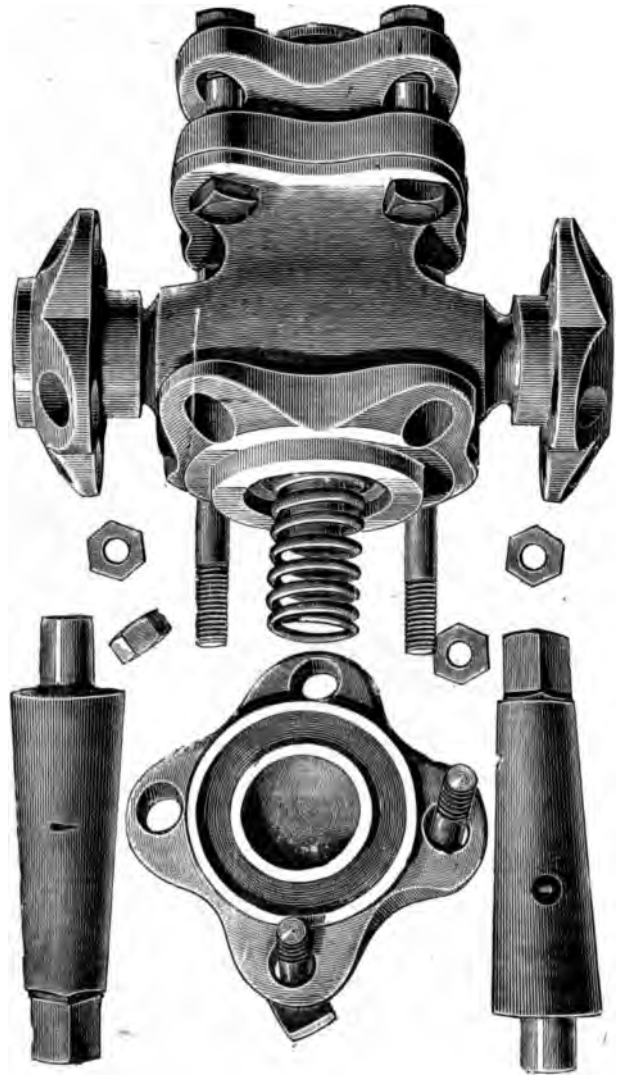


Fig. 115. — *Lavergne.* Robinet détendeur.

vaux indiqués au moteur et de 76 chevaux au compresseur, (rendement du mécanisme 0.755), soit 2900 calories par cheval-heure indiqués au compresseur : circulation d'huile $4^{m3},30$ par heure [1].

1. Wolson Wood, *Thermodynamics*, p. 351.

Machines Wood et Richmond (1)

L'ensemble de la machine de MM. Wood et Richmond, construite à New-York par MM. Wood et Shipley, est analogue à celui de la machine Lavergne; les cylindres des pompes sont aussi montés sur un bâti vertical et commandés directement par bielles et manivelles au moyen d'un moteur horizontal. Le piston, à garniture d'huile, n'a pas d'espaces nuisibles; les soupapes d'aspiration et de refoulement, disposées au haut des compresseurs et facilement accessibles, sont pourvues de *dash-pots* amortisseurs de chocs. La principale caractéristique des compresseurs est leur refroidissement par une injection de gaz ammoniac liquide pulvérisé en quantité suffisante pour y maintenir constamment le régime de saturation. Le condenseur a la forme d'un Baudelot sectionné en plusieurs compartiments de manière à parer à tout accident. Les robinets sont, comme les stuffing-box, rendus imperméables par des garnitures d'huile (fig. 92. p. 79). Quelques-unes de ces machines sont pourvues d'un détendeur automatique à pression constante. Les appareils de MM. Wood et Richmond fonctionnent d'une façon satisfaisante dans plusieurs installations importantes aux Etats-Unis. La vitesse ordinaire des pompes est de 100 tours par minute. Une machine à deux cylindres, de $200^{mm} \times 380^{mm}$, fournit, à cette vitesse et avec une puissance de 20 chevaux, 500 kilogrammes de glace à l'heure, dans les conditions ordinaires des climats tempérés. Nous avons déjà indiqué aux pages 77 et 70 quelques-uns des détails de construction les plus intéressants de ces machines, tels que la disposition particulière des séparateurs d'huile et des condenseurs à injection d'air, adoptés dans plusieurs installations.

Machines Puplett (2)

Les machines de M. Samuel Puplett sont du type horizontal. Leur compresseur à double effet est refroidi, comme celui de MM. Wood et Richmond, par une injection d'ammoniac liquéfié. Le condenseur est, comme nous l'avons vu, page 76, d'une forme spéciale, l'ammoniac passant tantôt à l'extérieur, tantôt à l'intérieur des tubes. Une partie de l'ammoniac achève de se liquéfier dans un serpentin plongé dans le bac à glace, de manière à diminuer la pression de liquéfaction. La machine Puplett est construite en Angleterre par la Pulsometer Engineering Company. Dans une de ces machines, installée à Birmingham, le compresseur, actionné par un train d'engrenages, marche deux

1. Brevets anglais 5798 de 1882, 7821 de 1885, 9547 de 1886. *American Machinist* 28 juin 1884. *Th. Engineer*, 4 février 1889.
2. Brevets anglais 12541. 12543 de 1884. 14378 de 1887. *The Engineer*, 25 janvier 1889. *Engineering*, 28 mai 1886.

fois moins vite que le moteur à vapeur ; la pression n'y dépasse pas 12 atmosphères avec de l'eau de condensation à 33°. La machine produit 25 tonnes de glace par jour, avec une dépense moyenne de 1 fr. 25 de charbon par tonne de glace. Nous décrivons plus bas le principe du frigorifère ou appareil à air froid de M. Puplett, ainsi que son procédé de fabrication de glace transparente par agitation.

Machines Fixary (1)

Les machines *Fixary*, construites en France par la *Société des Constructions mécaniques spéciales*, sont de deux sortes : horizontales et verticales.

Les machines verticales, dont un type de 50.000 calories à l'heure figurait à l'Exposition de 1889, sont à un cylindre depuis une production de 5 kilogrammes à l'heure jusqu'à 25 kilogrammes ; à partir de cette force, elles sont à deux cylindres. Ces cylindres, à simple effet (fig. 89, p. 72), sont conjugués au bas, sur les stuffing-box, par un bain d'huile dans lequel les pistons plongent au fond de leur course. Les soupapes d'aspiration et de refoulement sont placées au haut du cylindre et entourées d'eau. Une couche d'huile sur les pistons supprime tout espace nuisible. Les fuites de gaz ammoniac qui peuvent se produire dans les garnitures des pistons s'accumulent dans une chambre dite *chambre d'équilibre*, logée entre les deux cylindres, ponr s'en échapper à l'aspiration des pompes, et rentrer dans la circulation générale, dès que la pression atteint, dans la chambre d'équilibre, celle de l'aspiration (1 kilogramme à $1^{kg}.5$ absolus). Les fuites intérieures des cylindres ne sont donc pas perdues.

Quant aux fuites extérieures par le stuffing-box, elles sont évitées au moyen d'une garniture ingénieuse consistant essentiellement en une longue gaîne d'huile minérale refroidie tout autour de la tige du piston par une dérivation de l'ammoniac détendu. Cette huile se gèle en partie, et forme ainsi une sorte de garniture demi-fluide, ou *joint pâteux*, absolument imperméable et presque sans frottement.

Ce joint pâteux se retrouve employé avec autant d'efficacité et plus d'utilité, sur les machines horizontales à double effet, dont le stuffing-box est soumis directement à la pression de l'ammoniac refoulé.

1. Brevets anglais 3545, de 1883. 2387, de 1885. 3363 et 3793 de 1887. *Revue Industrielle*, 1er janvier 1886, 16 novembre 1889. *Annales Industrielles*, 20 janvier 1889. *Génie Civil*, 28 août 1885. 8 mai 1890 *Revue Universelle de la Brasserie*, 22 juillet 1888. *Moniteur de la Brasserie*, 15 janvier 1889. *Annales d'Hygiène publique et médico-légales*, juillet 1886. *Journal de la Chambre syndicale des bouchers de Paris*, 17 et 24 novembre, 1er décembre 1889. *La Nature*, 23 janvier 1890. Fixary. Nouveaux appareils frigorifiques (Paris Soussens 1880). Haton de la Goupillière. *Cours de machines*, tome I, p. 886. Lezé. *Machines à glace*, p. 76. A. Schwarz. *Eismaschinen*, p. 368.

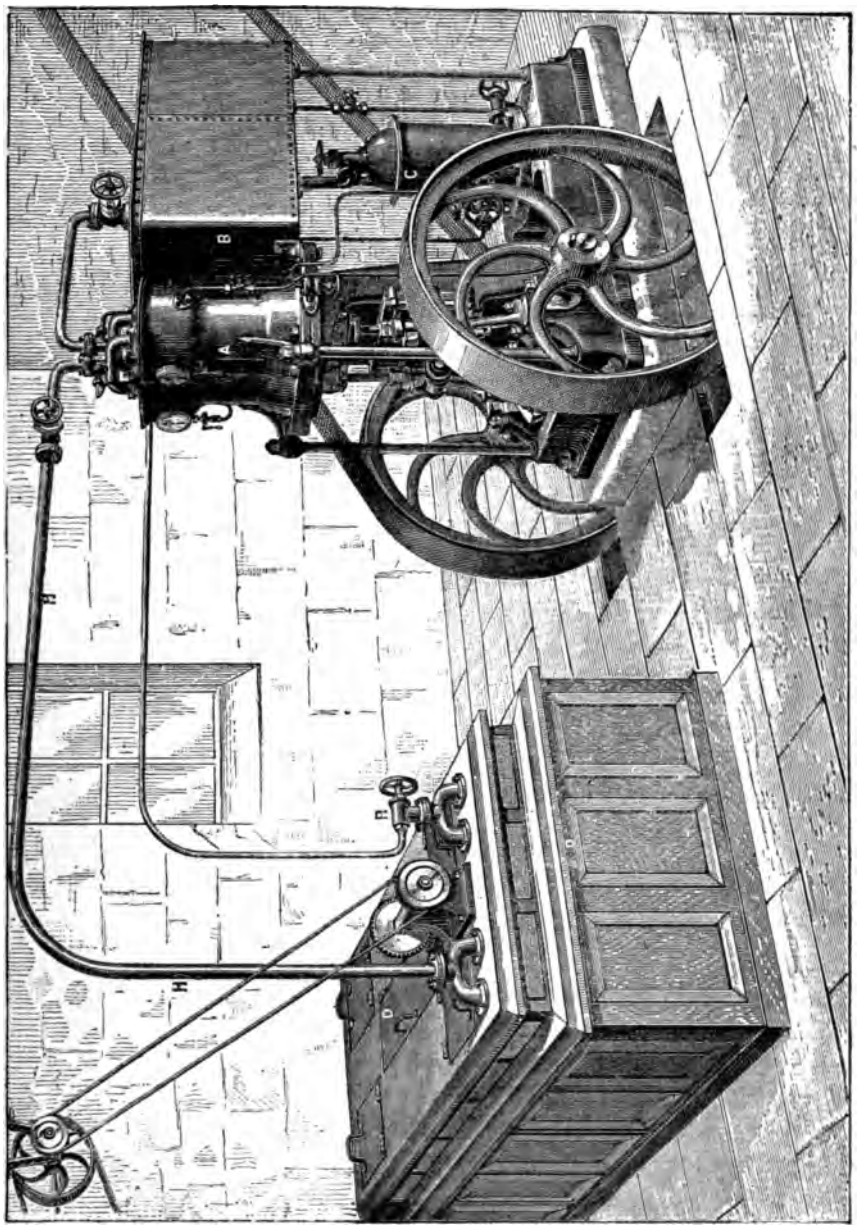


Fig. 116. — Machine *Fixary* de 300 kilogs de glace à l'heure.

Légende. — Moteur indépendant. La pompe de compression A refoule le gaz ammoniac dans les serpentins du condenseur, où il se liquéfie sous la pression de la pompe et sous l'action de l'eau en circulation. Le gaz liquéfié, recueilli dans le liquéfacteur C, est amené au robinet détendeur R, d'où il passe à l'état gazeux dans les serpentins du congélateur D, en produisant un froid intense.

Du congélateur, le gaz détendu revient par les tuyaux d'aspiration H à la pompe de compression A, pour être de nouveau liquéfié et refoulé dans une circulation continue.

Dans les deux types de machines, l'ammoniac traverse, avant d'arriver au condenseur, un séparateur d'huile. L'huile, ainsi séparée de l'ammoniac presque dès sa sortie du compresseur, passe en partie au joint pâteux, en partie à l'aspiration du compresseur, dont elle graisse les soupapes et le piston.

Quant à l'eau qui sert à faire la glace, elle passe, après sa filtration, dans un condenseur à surfaces alimenté, en tout ou en partie, par la vapeur d'échappement, et soumis au vide de la pompe à air du moteur. Cette eau se débarrasse ainsi de son air, en bouillant à une température de 70° à 80° ; de là, elle est refoulée au distributeur des mouleaux, sous la pression d'un accumulateur, au travers de serpentins refroidis par l'eau de circulation.

Nous reviendrons plus bas, en traitant des principales applications du froid, sur cette fabrication spéciale de la glace transparente, nous bornant, pour le moment, à décrire les machines seules du système Fixary.

La figure 116 et les planches 5-6 représentent l'ensemble d'une installation Fixary de moyenne importance, pour fabrication de la glace opaque depuis 50 jusqu'à 300 kilogrammes par heure. Ainsi qu'on le voit, jusqu'à cette force, le condenseur est porté par des colonnes fixées au bâtis même de la machine, dont l'ensemble forme ainsi un tout à la fois compacte et très accessible.

Nous ne saurions mieux décrire le fonctionnement et les principaux détails de cette machine qu'en reproduisant ici l'instruction rédigée par la *Société des Constructions mécaniques spéciales* pour le montage, le chargement, la mise en marche et la conduite des machines Fixary.

Les *organes principaux* de la machine proprement dite sont (pl. 5-6) les suivants :

A Compresseur,

B Condenseur,

C Récipient à gaz ammoniac liquéfié,

D Récipient à huile,

E Réfrigérant ou congélateur contenant les mouleaux à glace,

F Robinet isolant le compresseur du congélateur, et portant la prise de chargement O qui sert à l'introduction de l'ammoniac dans l'appareil.

G Robinet isolant le condenseur de la pompe à ammoniac,

H Robinet de réglage de la détente ou distributeur du gaz, au bac à glace,

I Appareil séparant le gaz de l'huile entraînée à sa sortie de la pompe A.

A ces organes principaux, s'en rattachent d'autres, d'un ordre secondaire, dont nous indiquerons l'emploi et l'utilité dans le cours de la description.

Principe de la machine. — Le principe de la machine est fondé sur la compression, la liquéfaction et l'évaporation successives du gaz ammoniac anhydre. On sait que, lorsqu'on liquéfie un gaz par la compression et qu'on le fait se détendre brusquement, le passage de l'état liquide à l'état gazeux produit un

froid considérable. Les changements d'état successifs et continus de cette masse de gaz ammoniac toujours la même sont obtenus de la manière suivante :

Supposons le récipient C chargé d'ammoniac liquéfié. En ouvrant le robinet L, le gaz, passant par le tuyau 1, arrivera à l'état liquide jusqu'au robinet de réglage H ; si l'on ouvre très légèrement ce robinet, le liquide s'élancera dans les serpentins du congélateur E, où, n'étant plus soumis à la pression qui le maintenait liquéfié, il se vaporisera rapidement sous l'action de la pompe, en produisant un froid considérable. Le gaz ammoniac, au fur et à mesure de sa formation, est aspiré au travers de la conduite 2, par les pistons de la pompe A, et refoulé, à travers le tuyau 3 et le séparateur I, dans le condenseur B, lequel doit, en marche normale, être constamment immergé dans un courant d'eau froide.

A chaque coup de piston, une nouvelle quantité de gaz ammoniac est refoulée dans le condenseur, où la pression monte rapidement.

Dès que cette pression atteint le maximum de tension du gaz ammoniac à la température de l'eau courante, ce gaz se liquéfie en abandonnant à l'eau qui entoure les serpentins du condenseur sa chaleur de compression et de liquéfaction.

Le gaz liquéfié s'accumule dans le récipient C, en passant par le tuyau 4. Le niveau indique la hauteur qu'atteint le liquide dans le récipient. De là, le gaz liquéfié va se détendre dans le congélateur E, ainsi que nous venons de le décrire, et ainsi de suite indéfiniment.

De cette façon, si la construction est assez soignée pour empêcher toute fuite de gaz, la même provision d'ammoniac anhydre peut servir indéfiniment.

Organes secondaires. — Les organes d'une importance secondaire sont les suivants :

K, Robinet isolant le condenseur B du récipient liquéfacteur C,

L, Robinet isolant le récipient C de la conduite qui amène l'ammoniac liquéfié au robinet de réglage H.

M, Robinet isolant le récipient D de l'appareil séparateur d'huile I.

Ces trois robinets n'ont d'autre but que de pouvoir, en cas de réparation ou de démontage d'un serpentin ou d'un tuyau, isoler le récipient C sans perdre l'ammoniac qu'il contient. En marche, ils doivent constamment rester ouverts, et ce n'est qu'en cas d'un *long arrêt* de la machine qu'ils doivent être fermés.

N, Robinet faisant communiquer le récipient d'ammoniac C avec le récipient, à l'huile D,

O, Petit robinet vissé sur le robinet F, et servant à l'introduction de l'ammoniac dans l'appareil,

P, Bouchon de purge d'air,

Q, Robinet servant à distribuer l'huile sous les pistons de la pompe A,

R, Robinet de réglage de la détente du gaz pour le joint congelé des presse-étoupes,

S, Soupape d'équilibre,

T, Bouchon de nettoyage,

U, Niveau.

Montage de la machine.

Le compresseur ou pompe à ammoniac est emballé tout monté. On n'a donc à faire sur place que les joints des quelques tuyaux qui relient les différents organes entre eux.

Les joints de ces tuyaux, ainsi que ceux de la conduite 2, qui relie le réfrigérant ou congélateur à la pompe à ammoniac, et ceux de la petite conduite 1, qui réunit le robinet d'isolement L au robinet de réglage H, devront être faits avec les plus grands soins. On emploie deux types de joints ; l'un à double encastrement pour les parties soumises à une haute pression, l'autre à un seul encastrement pour les pressions moindres. Les joints à double encastrement sont formés d'une rondelle en caoutchouc qui se monte sur le grand diamètre du joint, et d'une rondelle en plomb qui se met sur le petit. La rondelle en caoutchouc doit toujours être plus épaisse d'un millimètre que celle en plomb, pour être certain de bien serrer sur le caoutchouc.

Les joints à un seul encastrement sont formés d'une seule rondelle en caoutchouc de 2 millimètres d'épaisseur. Comme caoutchouc, employer de préférence des feuilles toilées ou contenant intérieurement un morceau de toile.

Soins spéciaux. — Avant de monter chaque tuyau, s'assurer qu'il n'a pas été bouché dans l'emballage ou le transport.

En faisant les soudures des brides en fer vissées sur les tuyaux, éviter de laisser pénétrer à l'intérieur des gouttes d'étain.

Enfin, avant de monter un tuyau qui a été coudé ou réparé, le dessécher complètement, en le chauffant sur toute sa longueur. S'il a été rempli de résine il faut le brûler et le laver avec soin.

Essai de la machine à la pression d'air avant son chargement. — Une fois la machine montée et serrée sur ses pierres d'assise, le congélateur et le condenseur bien de niveau, on procède à la vérification du montage et de l'étanchéité de tout l'appareil par l'essai à la pression d'air. A cet effet, on défait le raccord et on ouvre la clef du robinet d'introduction O, après avoir fermé soigneusement le robinet d'isolement F. Tous les autres robinets d'isolement (G, K, L), ainsi que le robinet de réglage H doivent rester ouverts.

Si l'on fait alors tourner doucement la pompe, l'air aspiré par le robinet O se répandra dans tout l'appareil, depuis le compresseur jusqu'au robinet d'isolement F (fermé), en passant à travers les serpentins du condenseur B et du congélateur E. On continue à faire marcher la pompe jusqu'à ce que le mano-

mètre de refoulement indique 20 atmosphères de pression ; après quoi, on arrête la pompe et on ferme le robinet O, qui permettait à l'air d'entrer. On laisse les choses dans cet état pendant plusieurs heures ; si les joints ont été bien faits, si tout l'ensemble est bien étanche, la pression doit, au bout de quelques instants, se maintenir sans déperdition.

Avoir soin, pendant cette opération, de laisser les bâches du condenseur et du congélateur pleines d'eau, car, s'il y avait la moindre fuite, on s'en rendrait compte par les bulles d'air qui se dégageraient et apparaîtraient à la surface de l'eau. Pour trouver les fuites qui pourraient se présenter par défaut de montage, on badigeonnera avec de l'eau de savon tous les joints et tous les tuyaux. Bien vérifier les robinets, les joints du compresseur, les presse-étoupes, les soudures des tuyaux, les raccords, etc., et, tout spécialement, les serpentins du condenseur et du congélateur.

Introduction de l'huile.— Une fois la machine éprouvée à l'air, on procède à son chargement d'huile. A cet effet, on enlève le chapeau et le clapet de la soupape d'équilibre S, et, par l'ouverture, on verse de l'huile spéciale lourde, de pétrole, en ayant soin de laisser ouvert le robinet de prise d'huile Q, afin de permettre à l'excès d'huile de descendre par le tuyau 5 dans le récipient D.

Quand le récipient D est plein aux 2/3, ce dont on peut s'assurer en démontant le robinet M, on remet en place la soupape d'équilibre, on refait soigneusement le joint du chapeau et celui du robinet M, après quoi on est prêt à procéder au chargement définitif du gaz dans la machine.

Circulation d'eau froide au condenseur. — Auparavant, on doit s'assurer que la circulation d'eau froide du condenseur est bien établie. L'eau doit arriver par le fond de la bâche, et s'écouler par le haut ; c'est-à-dire circuler en sens inverse du gaz.

Préparation du bain incongelable. — Les mouleaux étant préalablement remplis d'eau douce et mis à leur place, on sort du tonneau de chlorure de calcium une certaine quantité de sel que l'on dépose dans un baquet. On verse de l'eau dessus, on agite jusqu'à ce que le sel soit entièrement dissous. Le mélange une fois intime, le pèse-sel doit marquer 22° ; s'il marque moins, on ajoute du sel ; s'il marque plus, on ajoute de l'eau. Cette solution est parfaitement incongelable dans les conditions ordinaires. On la verse alors dans la cuve, en ayant soin d'éviter d'en introduire dans les mouleaux, et on continue l'opération jus qu'à ce que le niveau du bain dans la cuve vienne à 5 ou 6 centimètres au-dessous du haut des mouleaux.

S'assurer que la turbine agitatrice fonctionne bien, et que les courroies qui la commandent ne sont pas trop lâches.

Remplir les mouleaux d'eau douce jusqu'à 10 centimètres du bord.

Introduction du gaz dans la machine. — On livre à cet effet des bonbonnes métalliques chargées de gaz liquéfié parfaitement anhydre ; ces bonbonnes sont munies d'un robinet à raccord *a*, recouvert d'un chapeau de sûreté *b*, vissé à bloc. On dévisse le chapeau *b*, on place ensuite la bonbonne sur une balance puis, *sans ouvrir le robinet*, on fixe sur le raccord *a* un tuyau de plomb d'une longueur suffisante, qui vient aboutir par son autre extrémité au raccord *c* du petit robinet de remplissage *o*, fixé sur le robinet d'isolement F. Une fois le tuyau de plomb en place, les joints des raccords soigneusement faits, et le robinet *a* de la bonbonne toujours fermé, on procède à la *purge d'air de tout l'appareil.*

On démonte d'abord le bouchon de purge d'air P, puis on ouvre tous les robinets de la machine, sauf le robinet G, qui se trouve au-dessus du condenseur, et qu'on tient fermé. Si on met alors doucement la pompe en route, elle aspirera tout l'air contenu dans l'appareil et dans les conduites, et l'expulsera par le bouchon de purge P. Le robinet G, fermé, empêche l'air aspiré de rentrer dans la machine.

Pour les grosses machines, on laisse en commençant le robinet G légèrement ouvert, et on le ferme peu à peu, au fur et à mesure de l'écoulement de l'air.

Une fois l'air complètement expulsé, ce qui n'a lieu que lorsque le manomètre d'aspiration indique le vide, on arrête la pompe, on remet soigneusement en place le bouchon de purge d'air P, on ouvre le robinet G, et il ne reste plus qu'à introduire le gaz dans l'appareil.

Pour cela, on commence par fermer les robinets M, N et R, afin d'empêcher le gaz de pénétrer dans le récipient à l'huile D; puis, tous les autres robinets restant ouverts, la circulation d'eau froide dans le condenseur étant établie, on ouvre le robinet *a* de la bonbonne d'abord légèrement, jusqu'à ce que le manomètre d'aspiration marque une atmosphère, puis en grand, pour permettre au gaz de s'échapper librement. Le gaz s'écoulera immédiatement par le tuyau de plomb *b*, et se répandra par toute la machine, où il se mettra en équilibre de pression avec la bonbonne, ce dont on se rendra compte quand les aiguilles des deux manomètres resteront stationnaires, en indiquant une pression à peu près semblable. A ce moment, tout l'appareil est plein de gaz ammoniac à une pression variant suivant la température ambiante, et la moindre fuite est indiquée par la présence de l'odeur d'ammoniac ou d'une fumée blanche lorsqu'on présente un tampon imbibé d'acide chlorydrique.

Si l'on constate une fuite, il faut fermer immédiatement le robinet de la bonbonne, la réparer, et recommencer l'opération jusqu'à ce que l'on ne constate plus aucune fuite.

Pour faire une réparation, il faut toujours vider la machine de gaz, en l'expulsant par le robinet de purge P.

Quand l'étanchéité est absolue et que la machine est pleine de gaz à une

pression égale à celle de la bonbonne, celui-ci ne peut plus s'écouler à cause de l'équilibre de pression. On ferme alors les robinets de réglage H et d'isolelement L, et l'on met la pompe en mouvement. Elle aspire aussitôt les vapeurs contenues dans le congélateur ; un vide relatif s'établit, le gaz ammoniac s'échappe de la bonbonne et vient se détendre dans le congélateur.

La balance signale d'une façon permanente le poids du gaz absorbé, et l'on continue l'aspiration jusqu'à ce que le poids indiqué au tableau ci-desous soit entré dans l'apparail. Le gaz, au fur et à mesure qu'il est aspiré par la pompe, est refoulé dans le condenseur et dans le récipient C, où il se liquéfie. Le manomètre de compression monte, et marque la pression du condenseur.

TABLEAU DES CHARGES DE GAZ AMMONIAC ET DE CHLORURE POUR LES MACHINES A GLACE FIXARY

PRODUCTION des machines en glace à l'heure	GAZ AMMONIAC dans la machine	CHLORURE de calcium
25 kilogrammes	10 kilogrammes	350 kilogrammes
50 —	18 —	800 —
100 —	30 —	1400 —
200 —	60 —	2500 —
300 —	90 —	3500 —
500 —	150 —	7000 —
1000 —	300 —	12000 —
1500 —	420 —	15000 —

Niveau. — A partir du type produisant 100 kilogrammes de glace à l'heure, les machines ont un niveau U. Le haut du niveau correspond avec le récipient à gaz liquéfié C ; le bas avec le récipient à huile D. Dès que le gaz liquéfié vient se déposer dans le récipient C, on le voit monter dans le tube du niveau. Quand il atteint le haut du tube, la charge est suffisante. Bien avoir soin de tenir les robinets du niveau *constamment fermés.* On ne doit les ouvrir que pour s'assurer de la hauteur qu'atteint le liquide dans le tube, après quoi on les referme.

Démontage de la bonbonne. — Dès que la quantité de gaz ammoniac introduite est suffisante, on ferme le robinet *a* de la bonbonne et l'on continue à faire marcher la pompe jusqu'à ce que le manomètre d'aspiration marque le vide ; on ferme alors le robinet de chargement O, ainsi que le robinet d'isolement F ; on démonte le tuyau de plomb, et on remet en place les raccords.

Tout le gaz aspiré est alors accumulé dans le condenseur et dans le récipient E, et l'appareil est prêt à fonctionner en marche régulière.

Purge d'air. — Pendant l'opération du chargement, et le premier jour de la mise en marche régulière, on voit souvent le manomètre de compression indiquer une pression de 12 atmosphères et plus. Cela tient uniquement à ce qu'une certaine quantité d'air n'a pu être expulsée ou s'est introduite dans la machine pendant le chargement. La présence de cet air gêne la condensation du gaz, produit des élévations de température à la compression, et augmente considérablement la pression dans le condenseur. Il est indispensable de s'en débarrasser dès la mise en marche régulière. Pour cela, le robinet d'isolement étant fermé, on laisse la machine en repos pendant quelques heures, pour permettre à l'air qui s'est accumulé dans le condenseur et mélangé avec le gaz ammoniac de se séparer et de s'accumuler au-dessus du gaz liquéfié. Pour expulser cet air, on desserrera un peu le bouchon de purge P, après quoi, on ouvrira très légèrement le robinet d'isolement G, sans le *quitter de la main*. Aussitôt, on entendra l'air siffler par le bouchon P. Dès qu'il sera entièrement expulsé, on verra paraître les fumées blanches du gaz accusé par son odeur pénétrante. On referme alors immédiatement le robinet G, puis le bouchon de purge P. Une fois l'air expulsé, les rentrées d'air étant impossibles, la purge ne devra plus se faire qu'en cas d'un nouveau chargement d'huile ou d'ammoniac.

Mise en marche régulière. — Tous ces préparatifs terminés, les circulations d'eau bien établies, on peut commencer la mise en marche régulière.

On ouvre tous les robinets de la machine, sauf le robinet de réglage H et les deux petits robinets Q et R, et l'on met la pompe en route à sa vitesse normale. On ouvre alors très légèrement le robinet de réglage H. L'ammoniac liquide se précipitera immédiatement dans les serpentins du congélateur E, où il absorbera, par sa vaporisation et sa détente, la chaleur du bain, et, par suite, celle de l'eau contenue dans les mouleaux. Le froid se produit immédiatement, et l'on voit presque instantanément le givre se former à partir du robinet H. Il faut régler l'ouverture de ce robinet de façon à maintenir au manomètre d'aspiration une pression d'environ 1 atm., 5. S'il marque plus, on ferme progressivement le robinet de réglage, jusqu'à ce que la pression s'abaisse de la quantité voulue. Lorsque le manomètre d'aspiration restera à peu près stationnaire, à la pression de 1 atm., 5, le robinet de réglage sera à son point normal d'ouverture.

Congélation de l'huile qui entoure les presse-étoupes. — On sait que les pertes de gaz produites par les fuites inévitables des presse-étoupes sont considérées comme le plus grave défaut des machines à gaz liquéfiés en général. M. Fixary est arrivé à les supprimer totalement au moyen de joint spécial breveté, dont le principe consiste à congeler progressivement l'huile qui entoure les tiges des pistons au-dessus du presse-étoupes par la détente d'une dérivation du gaz ammoniac. Sous l'action du froid intense, cette huile se transforme en pâte lubrifiante, serrée et compacte, qui forme autour des tiges un joint absolument imperméable.

Sitôt la machine en marche, il suffira, pour procéder à la congélation de l'huile, d'ouvrir très légèrement le petit robinet R, placé sur le plateau supérieur du bâti. Avoir soin de ne donner que la petite quantité de froid nécessaire pour voir le givre se maintenir sur le petit tuyau 7, d'échappement du gaz ayant servi à la congélation. Toujours refermer le robinet R quelques minutes avant l'arrêt.

Graissage en marche. — Pour graisser en marche, on ouvrira toutes les cinq ou six heures, légèrement et pendant quelques secondes seulement, le robinet Q, placé sur le récipient à l'huile D. La pression de ce récipient fera immédiatement monter l'huile dans le tuyau 5, et l'amènera en quantité suffisante sous les pistons du compresseur, dans les cavités qui entourent les tiges du piston.

Pression normale à la compression. — La pression indiquée au manomètre de compression varie entre 8 et 9 atmosphères, suivant la température de l'eau de condensation. Cette pression peut atteindre 11 et 12 atmosphères dans les pays chauds. Elle est, comme on le voit, supérieure aux pressions maxima données par Regnault à égale température d'eau de condensation. Cette différence provient de l'état d'activité du gaz dans le condenseur. C'est pourquoi l'on voit, sitôt qu'on arrête la machine pendant quelques heures, le manomètre baisser et indiquer une pression inférieure à celle de la marche régulière.

Production de la glace. — Sitôt la mise en marche régulière, le froid commence à se produire dans les serpentins du congélateur E. Il est transmis aux mouleaux qui contiennent l'eau à congeler par le bain de chlorure de calcium qui les entoure. La température de ce bain s'abaisse graduellement, et atteint, au bout de quelques heures, 10 à 12 degrés.

Dans la plupart des cas, c'est la température normale que l'on doit maintenir stationnaire.

Le bain est constamment agité par une petite turbine qui en égalise la température, et qui accélère la congélation en renouvelant les surfaces de contact.

Le meilleur rendement est obtenu en retirant de la cuve, chaque demi-heure ou chaque heure, les mouleaux entièrement congelés, et en les remplaçant de suite par d'autres mouleaux pleins d'eau, afin de maintenir le bain incongelable au même niveau et ne pas perdre le temps de congélation.

Il faut avoir soin de sortir doucement les mouleaux et de les laisser égoutter pendant quelques instants dans la cuve, afin de diminuer le plus possible les pertes du bain incongelable. Pour détacher les blocs de glace, on plonge les mouleaux dans une petite bâche qui se trouve à l'extrémité du bac, et dans laquelle on entretient le l'eau à 25° environ.

A la longue, la salure du bain diminue à cause de l'eau douce que les mouleaux amènent dans la cuve par suite du démoulage. Le pèse-sel indique constamment le degré de salure et le moment où il faut rajouter du sel.

TABLEAU DE LA TEMPÉRATURE DE CONGÉLATION
POUR DIVERS DEGRÉS DE SALURE DU BAIN INCONGELABLE

EAU	CHLORURE de calcium	DEGRÉS marqués par le pèse-sel	TEMPÉRATURE de la congélation du bain	
100 parties	0 parties	0°	0° centigr.	0° réamur
90 »	10 »	7°,5	3°,5 »	2°,8 »
80 »	20 »	12°,5	7°,5 »	6° »
70 »	30 »	16°,5	14° »	11°,5 »
60 »	40 »	20°	21° »	16°,8 »
50 »	50 »	25°	32° »	25°,6 »

On voit, d'après ce tableau, que, pour éviter la congélation du bain salé, l'on ne doit jamais laisser la solution saline descendre au-dessous de 15° au pèse-sel. On devra donc, tous les 4 à 5 jours, vérifier au pèse-sel la densité du bain.

Arrêt de la machine. — Lorsque, pour une cause quelconque, on aura besoin d'arrêter la machine, on commencera par fermer, *quelques instants avant l'arrêt*, le petit robinet R, qui sert à la congélation de l'huile du presse-étoupes, et le robinet H, pour que la pompe ait le temps d'aspirer et de refouler dans le condenseur la quantité d'ammoniac que peuvent contenir les serpentins de vaporisation du congélateur E.

Sitôt après l'arrêt de la pompe, on fermera le robinet d'isolement G, ainsi que les robinets de circulation d'eau ; puis, si on le juge nécessaire d'après le temps écoulé depuis le graissage précédent, on fera remonter un peu d'huile sous les pistons, en ouvrant légèrement, pendant 2 ou 3 secondes, le robinet Q.

Si l'arrêt doit être prolongé, on doit s'assurer de la bonne fermeture des robinets ; et, si les presse-étoupes perdent un peu d'huile, on resserre les écrous immédiatement après l'arrêt.

Résumé des manœuvres pour la conduite régulière.

1° Ne jamais mettre en route sans ouvrir préalablement le robinet G.

Le refermer sitôt après l'arrêt.

2° Ouvrir le robinet de réglage H et le petit robinet R, qui sert à la congélation des presse-étoupes, quelques secondes seulement après la mise en marche.

Les fermer quelques secondes après avant l'arrêt.

3° Pour graisser, ouvrir légèrement, et pendant 2 ou 3 secondes le robinet de graissage Q.

4° Pour les arrêts d'une certaine durée, fermer le robinet d'isolement F du congélateur.

L'ouvrir à la mise en marche.

5° S'assurer, en marche, de la circulation régulière de l'eau dans le condenseur. La suspendre pendant les arrêts.

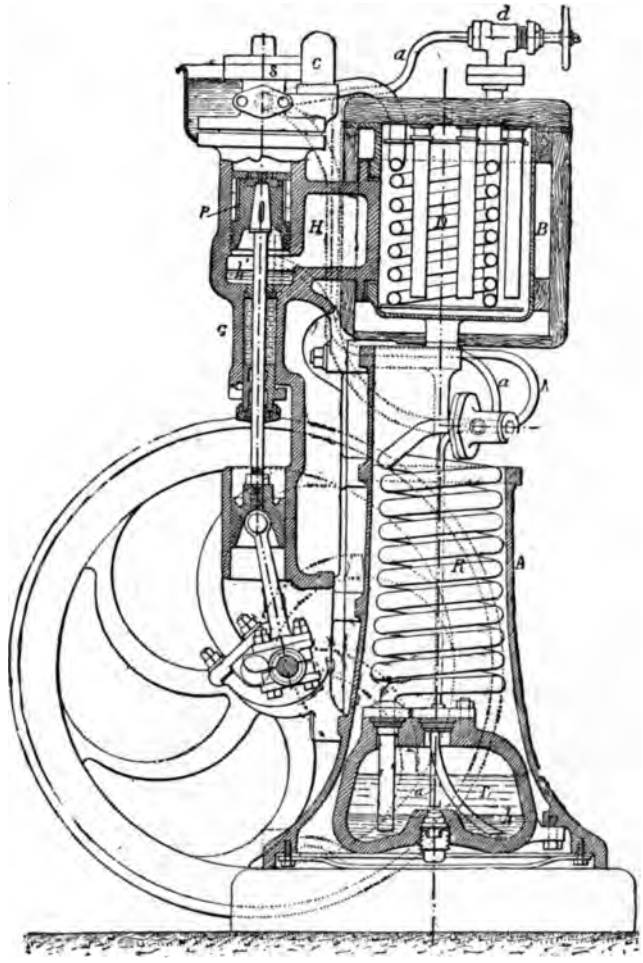


Fig. 117. — *Machine Fixary de 10 kilogrammes de glace à l'heure.*

p, piston de la pompe, *h*, bain d'huile. H, chambre de refroidissement, *c*, soupape d'équilibre *s*, soupape refoulant le gaz aspiré en D dans le serpentin R du condenseur A. L, liquéfacteur d'où l'ammoniac liquéfié passe, par *a a*, au robinet de détente *d*. B, congélateur.

Moyen de découvrir les fuites de gaz. — Les fuites de gaz ammoniac se reconnaissent facilement par l'odeur lorsqu'elles ont une certaine importance. Elles peuvent être découvertes, lorsqu'elles sont faibles, au moyen d'un papier tournesol qui, présenté aux abords des joints, devient bleuâtre en présence des fuites les plus insignifiantes.

Observation. — Pour vider *entièrement* une bonbonne du gaz qu'elle renferme, il faut la renverser sans dessus dessous, de façon à avoir la prise du gaz du robinet *a* en bas ou en haut. Quand elle est à peu près vide, jeter dessus un peu d'eau chaude pour expulser tout le gaz.

Pour les très petites productions : une dizaine de kilogrammes de glace à l'heure, on donne aux machines Fixary la forme représentée par la figure 117 très simple, dans laquelle le condenseur et le liquéfacteur sont renfermés à l'intérieur d'une colonne qni supporte le bac à glace.

Ces machines tiennent peu de place, elles n'entraînent pas de frais d'installation. On les pose sur une pierre d'assise sans fondation, et elles peuvent produire de la glace presque aussitôt après leur arrivée.

La première personne venue apprend en quelques heures à les conduire et à les tenir en parfait état. Elles nécessitent peu de force motrice : 1 cheval pour le modèle de 5 kilogrammes, 1 cheval 1/2 à 2 chevaux pour le modèle de 10 kilogrammes. Elles peuvent être actionnées par un moteur spécial à gaz, à pétrole ou à vapeur, par une transmission quelconque, ou par un petit manège.

L'appareil se compose d'un bâti en fonte qui contient, dans le bas, le serpentin de refoulement ou condenseur A et le récipient à ammoniac liquide E ; il supporte à sa partie supérieure le congélateur B, avec son serpentin de détente D, ainsi que la pompe d'aspiration et de refoulement G, qui porte avec elle sa chambre de refroidissement H, et sa soupape d'équilibre régulatrice C.

La pompe est à simple effet, le gaz ammoniac n'y est admis qu'au-dessus du piston P. La soupape régulatrice ou d'*équilibre* C, en communication avec la soupape d'aspiration et la chambre de graissage H, permet d'y maintenir une certaine pression du gaz ammoniac provenant des fuites du piston P, qui s'accumulent au-dessus de l'huile formant joint hydraulique autour de la tige de piston. On empêche ainsi à la fois l'entrée de l'air à l'intérieur de l'appareil et les fuites de gaz à l'extérieur.

Les pertes d'ammoniac sont donc entièrement nulles, et la machine, une fois remplie d'ammoniac, peut fonctionner sans qu'il soit nécessaire d'en renouveler la charge.

L'huile contenue dans la chambre de refroidissement H, et formant joint hydraulique autour de la tige du piston, lubrifie le gaz provenant des fuites intérieures en même temps qu'il se refroidit. Enfin, lorsque, par suite de ces fuites intérieures, la pression augmente dans la chambre H. la soupape C, se soulève ; le gaz lubrifié s'échappe, puis est aspiré dans le corps de pompe, où il assure un graissage automatique et constant, tout en remplissant les espaces nuisibles.

Dans les machines Fixary horizontales (fig. 118), le compresseur est à double effet, avec joint pâteux et soupapes à dash-pot. Une machine Fixary de ce type, faisant 1000 à 1200 kilogrammes de glace à l'heure, exige environ 35 chevaux et 20 mètres cubes d'eau de condensation à 10°.

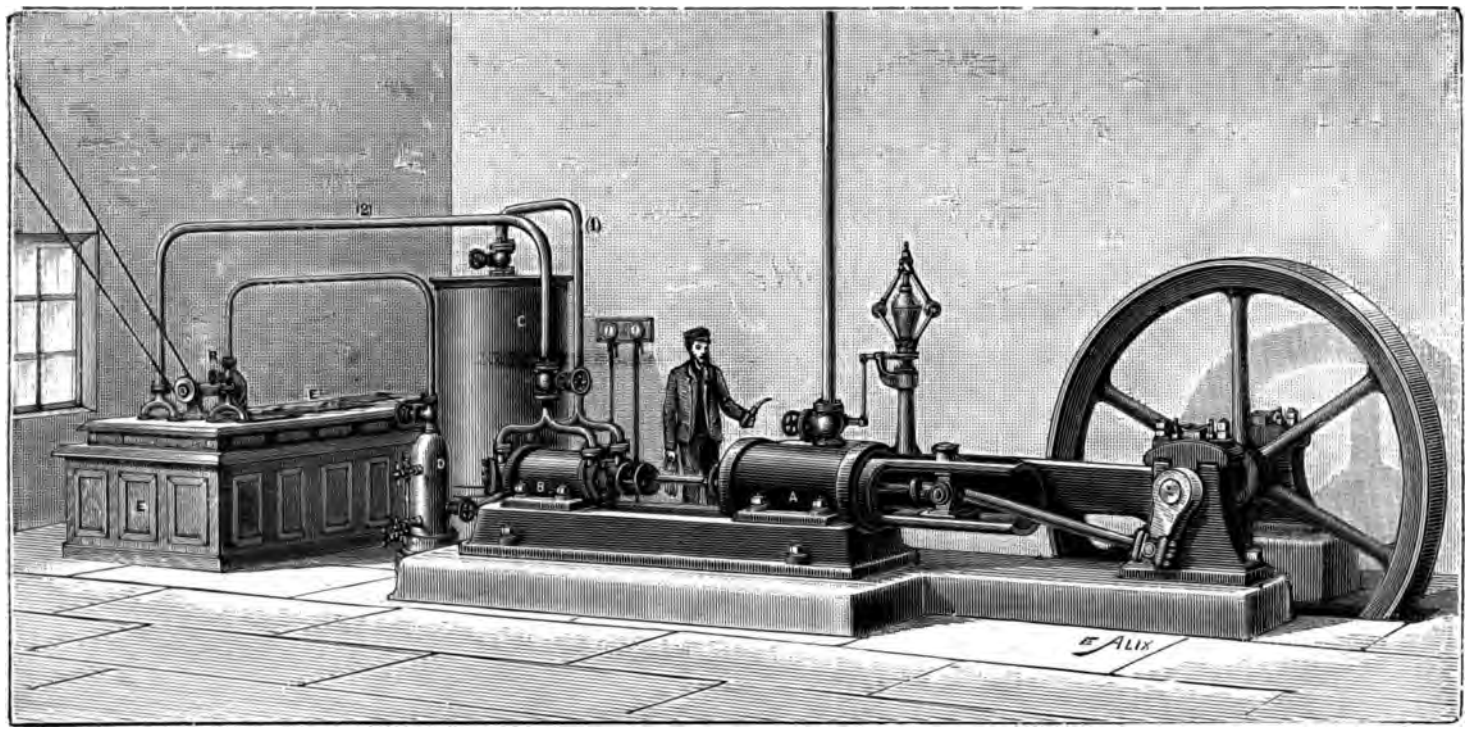


Fig. 118. — *Machine Fixary*, type horizontal.

Le cylindre à vapeur A actionne directement le compressseur à double effet B, lequel refoule le gaz ammoniac à travers la conduite 1 dans les serpentins du condenseur C, où il se liquéfie sous la pression du compresseur et sous l'action de l'eau en circulation. Le gaz liquéfié est recueilli dans le récipient D, et amené au robinet détenteur R, d'où il passe à l'état gazeux dans les serpentins du congélateur E, en produisant un froid intense. Du congélateur E, le gaz détendu revient, par la conduite d'aspiration 2, au compresseur B, pour être de nouveau refoulé dans le condenseur C, et reliquéfié dans une circulation continue.

Machines à acide carbonique

Les premières machines à acide carbonique à peu près industrielles sont dues à deux ingénieurs allemands : MM. *Raydt* et *Windhausen*. La machine de Raydt ne figurait pas à l'Exposition ; celles de Windhausen, construites en Belgique par Halot, en Suisse par Escher Wyss et en Angleterre par Hall, y figuraient sous deux formes différentes ; un type vertical et un type horizontal très remarquables.

Machine de Raydt (1)

Le compresseur de la machine Raydt est horizontal à simple effet : son piston-plongeur, très long relativement à son diamètre, est creux et rafraîchi intérieurement par une circulation de liquide incongelable, qui le traverse suivant le trajet *x y* (fig. 120). Au fond de course, il vient toucher la soupape de refoulement avec un espace nuisible réduit au minimum.

Le joint du stuffing-box est constitué par une double garniture : une garniture solide *s* et une garniture liquide *oo*, d'eau glycériné. Cette eau, que l'on renouvelle par *b r*, communique par le tuyau *h* avec un gazomètre E (fig. 119) où se recueillent les fuites d'acide carbonique, échappées à la garniture intérieure.

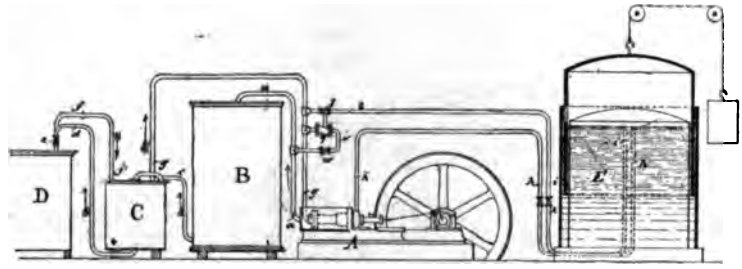


Fig. 119. — *Ensemble de la machine Raydt.*

Légende. — A compresseur refoulant l'acide carbonique par *a*, au condenseur B, d'où il va par *c* au liquéfacteur C, puis, par *d*, au robinet de détente *e* du bac à glace D. De là, l'acide carbonique revient, par *f*, autour du liquéfacteur, puis, par *g*, à l'aspiration du compresseur. E, gazomètre recevant par *hh* les fuites de la garniture du compresseur et les restituant au condenseur par (*k*, *v*, *w*, *a*) sous l'impulsion de l'injecteur *q*, alimenté, par *l*, d'acide carbonique liquéfié.

On restitue de temps en temps l'acide carbonique du gazomètre E à la circulation au moyen d'un injecteur *q*, qui l'aspire par le tube *i* et le refoule par *v w* dans le condenseur B, à l'aide d'un jet d'acide carbonique liquide à 60 atmosphères, pris au réfrigérant liquéfacteur C.

(1) Brevet anglais 15475 de 1884.

Ce liquéfacteur, placé entre le condenseur B et le bac à glace D, se compose (fig.121) d'une bonbonne F, en acier coulé, plongée dans le liquide de la bâche C, incongelable et refroidi par un serpentin *f g*, parcouru par l'acide carbonique encore très froid, qui revient du bac à glace à l'aspiration du compresseur.

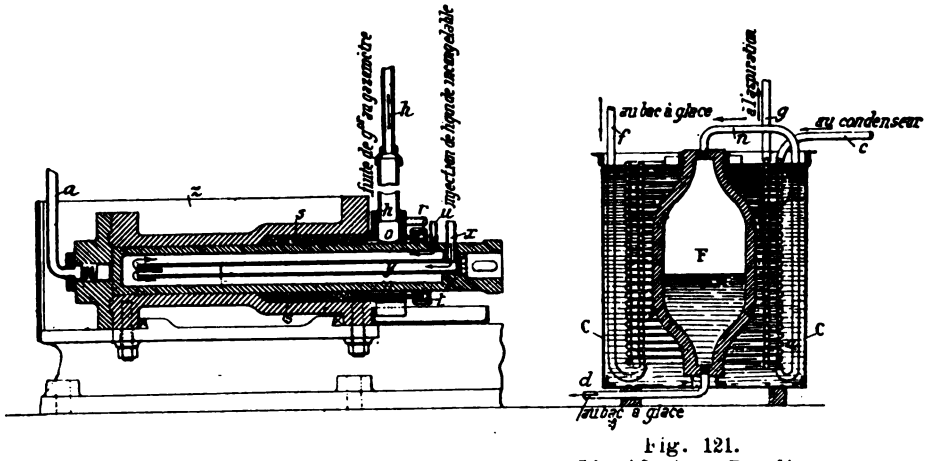


Fig. 120. — *Compresseur Raydt.*

Légende. — Le long piston creux K est rafraîchi intérieurement par une circulation d'eau *x y u*, et le compresseur baigne dans l'eau d'une bâche *z*. Le stuffing-box intérieur *s* est précédé d'une garniture extérieure *o*, alimentée de glycérine par le tuyau *r* et mis en rappprt, par *oh*, avec un gazomètre dans lequel s'accumulent les fuites d'acide carbonique échappées de *s*.

Fig. 121.
Liquéfacteur Raydt.

Légende.— Le liquéfacteur A, qui reçoit par *c n* l'acide carbonique refoulé au condenseur et l'évacue à l'état liquide en *d*, plonge dans un bac plein d'un liquide incongelable que refroidit le serpentin *fpg*, parcouru par l'acide carbonique détendu, revenant du bac à glace à l'aspiration du compresseur.

L'acide carbonique refoulé par le compresseur passe du tuyau *a* (fig.119) au serpentin du condenseur ou premier refroidisseur B, puis, par (*cmpn*), au liquéfacteur F, d'où il va, par *d*, au robinet détendeur *e* du bac à glace. Le refroidissement du liquéfacteur par le retour de l'acide carbonique du bac à glace au compresseur permet de diminuer considérablement la pression de liquéfaction du gaz qui ne dépasserait pas, d'après M. Raydt, environ 60 atmosphères.

La machine de Raydt est donc caractérisée par trois particularités principales :

Un piston de compresseur long et creux, rafraîchi par une circulation de liquide incongelable.

Une garniture double à récupération des fuites dans un gazomètre, de sorte que la garniture extérieure ne doit plus supporter que la pression de ce gazomètre au lieu de la pression d'aspiration, qui s'élève à 20 ou 25 atmosphères.

Un liquéfacteur, ou récipient d'acide carbonique liquide, refroidi par le retour

de l'acide carbonique détendu et très froid, qui revient du bac à glace à l'aspiration du compresseur : ce refroidissement complémentaire ayant pour effet d'abaisser la pression de liquéfaction.

Machines de Windhausen

Le compresseur de la machine verticale exposée par M. Windhausen (1) est représenté dans ses principaux détails par les figures 122 et 123.

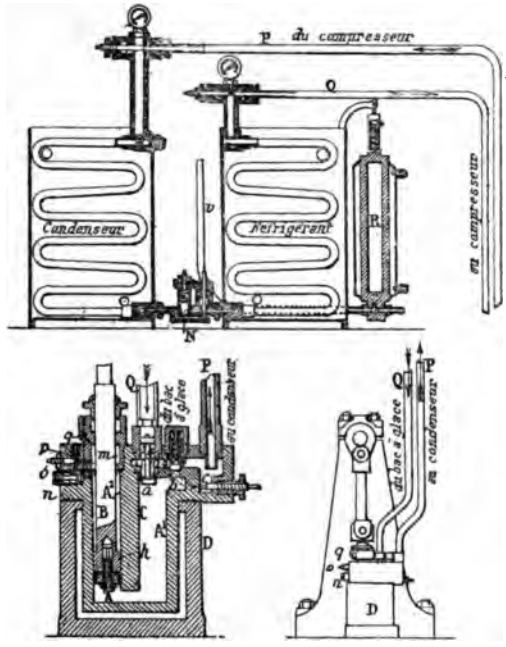


Fig. 122 et 123. — *Windhausen.* Machine à acide carbonique verticale. Ensemble de la machine et détail de la pompe.
B, piston refoulant en AA' une masse invariable de liquide glycériné, *a*, soupape d'aspiration de l'acide carbonique revenant du bac à glace par le tuyau Q, *b*, soupape de refoulement, *c*, robinet de récupération. *m*, garniture liquide dont les fuites sont envoyées en A_2 par le robinet à pointe *p* et la soupape *n*. *h*, soupape renvoyant en A les fuites accumulées en A^2. P tuyau de refoulement de l'acide carbonique au condenseur. N, soupape de détente du condenseur au réfrigérant. R, bonbonne d'acide carbonique en chargement.

Le piston B refoule et aspire l'acide carbonique non pas directement mais par l'intermédiaire d'une masse liquide analogue à celle des compresseurs Sommeiller. Lorsque le piston est au fond de course inférieur, comme sur la figure 122

(1) Brevet anglais 2864 de 1886.

cette masse, qui occupe dans le corps de pompe tout l'espace A A_1, a refoulé l'acide carbonique au compresseur au travers de la soupape *l*, qu'elle déborde un peu de manière à supprimer tout espace nuisible. Au retour du piston, la masse liquide le suit en aspirant par *a* l'acide carbonique détendu qui revient du bac à glace. L'excédent de liquide refoulé au dessus de la soupape *l*, afin d'éviter tout espace nuisible, revient, par le robinet *c*, au-dessus de la soupape d'aspiration, qui le restitue ainsi au corps de pompe. Les fuites du liquide qui pourraient se produire autour de la garniture du piston B, dans son espace annulaire, reviennent, à la montée, par la soupape *h*. Le liquide qui fuit, pendant la montée du piston, au travers de sa garniture supérieure *i*, se recueille dans la chambre *m*, d'où il est aspiré dans l'espace annulaire, à chaque descente, par le conduit *p*, ouvert par la vis à pointe *o*, et au travers du clapet de retenue *n*. La chambre *m* peut être ouverte à l'atmosphère ou isolée par le robinet *q*. Le piston liquide doit être constitué par un corps qui n'absorbe pas l'acide carbonique, de l'eau glycérinée, par exemple, et son extrémité inférieure par un liquide lubrifiant en quantité suffisante pour déborder de la cloison C quand le piston

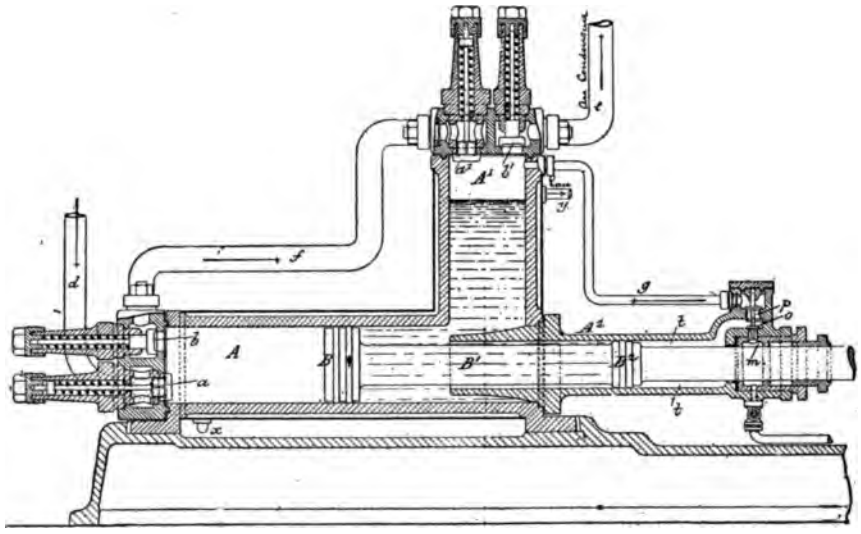


Fig. 124. — *Windhausen. Compresseur compound.*

d, tuyau amenant l'acide carbonique du bac à glace à l'aspiration *a* du cylindre A. dont le piston B le refoule, par *b f a*, au cylindre A_1 au-dessus de la masse d'eau glycérinée BB'A'. (*m p o g*) appareil récupérateur des fuites de gaz et de liquide s'accumulant en *i* au travers du piston B_2. *b' l*, refoulement de l'acide carbonique au liquéfacteur. *x y*, circulation d'eau autour des compresseurs.

est au bas de sa course. Enfin l'espace annulaire A_2 doit être d'un volume tel que l'air qui pourrait s'introduire avec le liquide de *m* n'y atteigne jamais, à la montée du piston, une pression égale à celle de l'acide carbonique à l'aspiration :

on évite ainsi toute rentrée d'air dans l'acide carbonique. Le corps de pompe, en acier coulé, est entouré d'une enveloppe D, à circulation d'eau.

L'acide carbonique refoulé par le compresseur en P passe du condenseur liquéfacteur au réfrigérant par une soupape N, dont la charge, réglable à volonté, détermine son degré de détente. On peut aussi dériver directement l'acide carbonique liquide dans une bonbonne R, mise en communication à volonté, par un robinet à trois voies, avec le condenseur ou avec d'autres bonbonnes, de sorte que la machine peut servir à fabriquer momentanément de l'acide carbonique liquide. Le gaz, amené par U au serpentin du réfrigérant, puis aspiré par Q au compresseur, est, dans ce cas, liquéfié en R, comme nous venons de le voir.

La machine verticale de ce type, exposée par la Société Cail-Haloü, marchait très régulièrement ; il fallait seulement renouveler de temps en temps l'eau glycérinée. Les pressions oscillaient entre 25 atmosphères à l'aspiration et 80 atmosphères au refoulement. Nous ne possédons aucune donnée sur le rendement de cette intéressante machine.

La deuxième machine exposée par M. Windhausen, sous les auspices de la Société Cail-Halot, était du type horizontal Compound (1).

La figure 124 représente une coupe longitudinale du compresseur de cette machine. La compression s'y opère en deux temps : l'acide carbonique, aspiré ou plutôt admis du bac à glace en A par la soupape *a*, est refoulé par (*b f* a_1) en A, au dessus d'une masse d'eau glycérinée qui remplit en partie le corps de pompe A_1. Au retour du piston B, ce liquide achève la compression du gaz en remplissant complètement A_1 et en refoulant, par *b'*, sans aucun espace nuisible, l'acide carbonique au condenseur liquéfacteur. Les fuites échappées le long de la grosse tige B' et autour de B_2 sont refoulées par ce piston de l'espace annulaire *t* au haut de A, par *g*, au travers du clapet de retenue *p* ; enfin, le peu de liquide qui s'échapperait en *m* serait, à la course de droite à gauche de B_2, aspiré en *t* puis refoulé en A_1 comme nous venons de le dire. Le compresseur est rafraîchi par une circulation d'eau *x y*.

Dans la variante verticale représentée par la figure 125 les deux cylindres A A_1 sont concentriques et communiquent par les ouvertures *n*. Les organes analogues à ceux de la figure 124 y sont affectés des mêmes lettres, de sorte qu'il est facile d'en suivre la marche.

Le fonctionnement de la machine représentée par la figure 126, qui n'était pas représentée à l'exposition, est un peu différent.

L'acide carbonique aspiré par *d* et *d'* en a_2, au-dessus des soupapes d'admission *a a'*, est refoulé en *c* au travers des soupapes *b b'*. Dans le compresseur A, c'est la face supérieure du piston B qui aspire et refoule l'acide carbonique :

(1) Brevets anglais 2548 2549 de 1888. G. Behrend, *Eismaschinen*, p. 264.

dans le compresseur A', c'est l'eau glycérinée remplissant en partie les corps de pompes AA' qui accomplit ces fonctions. Il suffirait évidemment de fermer la

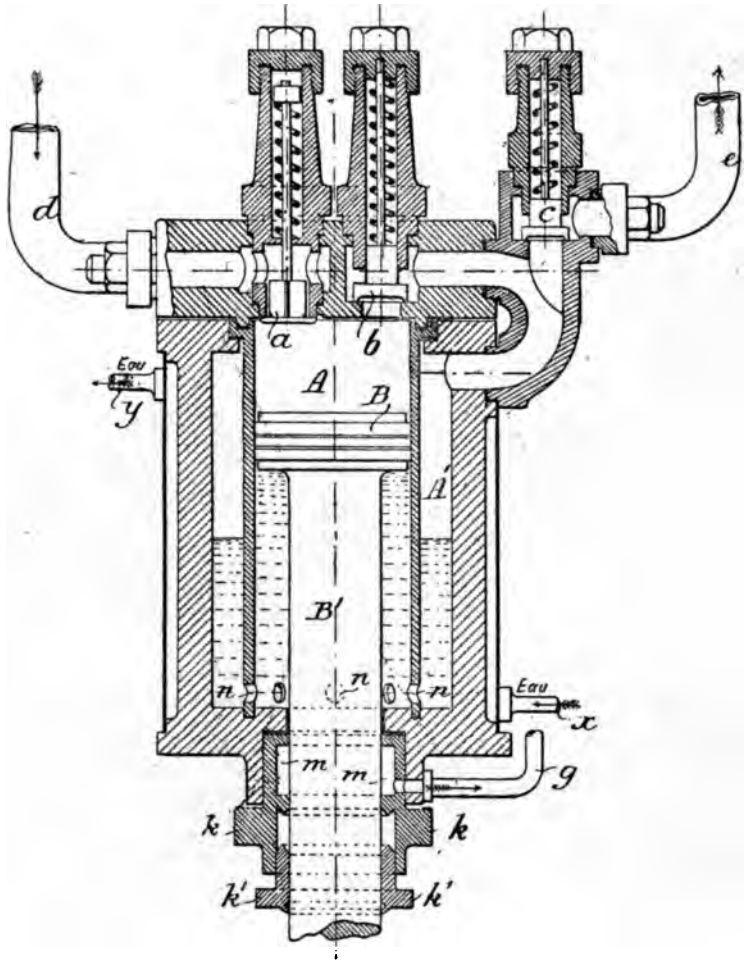


Fig. 125. — *Windhausen. Compresseur vertical compound.*

d a, aspiration en A. *b*, refoulement dans l'espace annulaire A', C, refoulement en *e*, au condenseur, par le liquide B'A, au travers des trous *nn*.
k k m, double garniture avec récupération des fuites au détendeur par *g*.

communication de *b* avec *e*, et de dériver le refoulement de *b* sur a^2, séparé de *d'*, pour effectuer la compression en deux temps.

L'acide carbonique refoulé de *e* au liquéfacteur arrive, par *c'*, au cylindre détendeur D, au travers d'une soupape de détente *h*. Cette soupape, traversée par

une tige h' chargée en h_3 par un ressort h_2, se soulève quand la poussée du piston c sur la tige h' comprime le ressort d'une quantité supérieure à la pres-

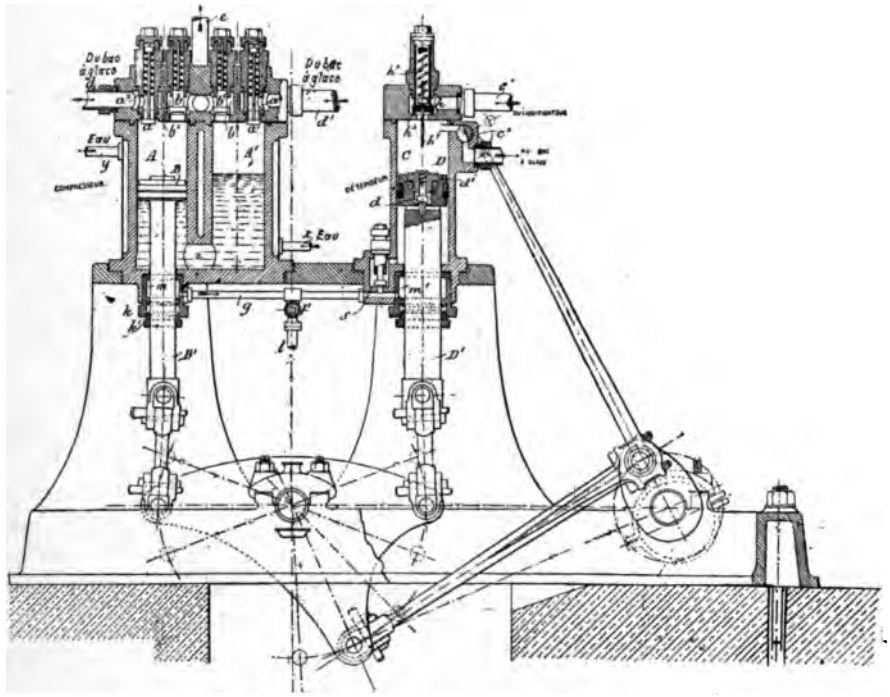


Fig. 126. — *Machine Windhausen a détendeur.*

Les deux compresseurs AA' communiquent au bas par une ouverture x. Les soupapes d'aspiration a a^5 communiquent entre elles par a_2, et les soupapes de refoulement b b_1 par la chambre a_2. En A, c'est la face sèche du piston B, et en A', la masse liquide même qui aspire l'acide carbonique par d d' et le refoule au condenseur par e. Les compresseurs sont refroidis par une circulation d'eau xy. Le haut du détendeur D, dont la tige du piston D' est conjuguée par un balancier à la tige B' du piston compresseur, porte une soupape d'admission h, qui communique par c' avec l'acide carbonique du liquéfacteur : cette soupape est chargée en h_3 par un ressort h_2. Le piston D vient, dans sa montée, heurter la tige h' de ce ressort, et le comprime jusqu'à ce que sa résistance soit égale à la pression exercée sur h par l'acide carbonique liquide : la soupape p se soulève alors et laisse l'acide carbonique liquide pénétrer en c jusqu'à ce que, au retour de D, la butée p_2 vienne refermer p : à partir de ce point jusqu'à la fin de la course descendante de D, l'acide carbonique développe en C un travail de détente qui s'ajoute à celui du moteur sur B. A la montée de D, et jusqu'à ce qu'il vienne soulever de nouveau p, le robinet c_2 s'ouvre de manière que l'acide carbonique détendu en C passe au serpentin du bac à glace. C'est donc la longueur de la tige h' qui règle la détente de l'acide carbonique. Les fuites d'acide carbonique autour de D s'accumulent au bas du détendeur, et repassent en C par la soupape d et le conduit d', en même temps que celles du stuffing-box k k', amenées de la garniture liquide intérieure m au bas du détendeur par le tuyau g et la soupape s.

sion que l'acide carbonique exerce sur la soupape. Une fois levée, pendant la descente du piston C, la soupape reste ouverte tant que la tige h' touche ce pis-

ton ; c'est donc la longueur de la tige *h'* qui règle l'admission de l'acide carbonique au détendeur, et l'on voit que le travail de détente aide celui du piston B, conjugué à C par un balancier. A' la montée du piston C, l'acide carbonique détendu s'évacue au bac à glace au travers du robinet c_2. Les fuites recueillies en *m* et en *m'* passent, par la soupape *s*, dans l'espace annulaire ménagé autour de D', puis, par la soupape *d*, dans le cylindre détendeur, qui les restitue à la circulation.

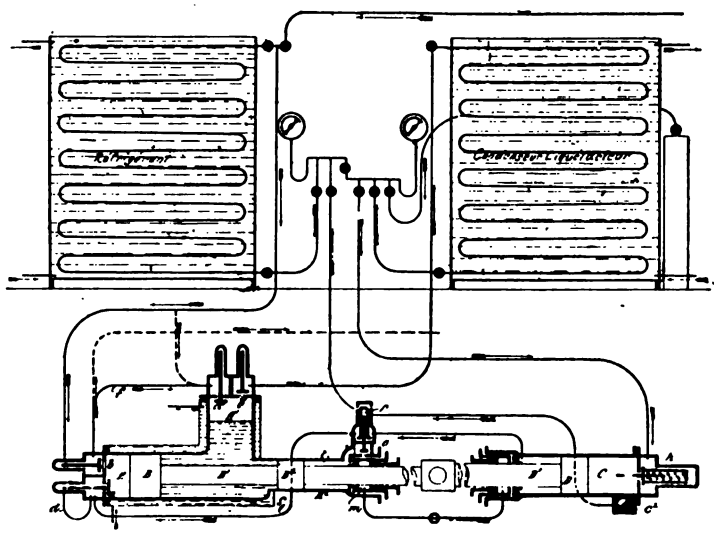


Fig. 127. — *Windhausen. Machine compound horizontale à détendeur.*

A A' ..... compresseur compound semblable à celui de la figure 124.
D' D C ... détendeur semblable à celui de la figure 126.
Mêmes lettres que sur les figures 124 et 126.

La figure 127 représente l'application de ce détendeur à une machine horizontale analogue à celle représentée par la figure 126 : la correspondance des lettres dispense de toute explication complémentaire.

Machines a absorption ou a affinité

Le principe général des machines à absorption ou à affinité est le suivant :

On évapore sous pression une dissolution ammoniacale concentrée du commerce : le gaz ammoniac dégagé, refroidi par une circulation d'eau, se liquéfie dans un *condenseur*, d'où il se détend en produisant du froid dans un réfrigérant. Au sortir du réfrigérant, le gaz ammoniac se rend dans un vase plein d'eau ou *absorbeur*, et se dissout dans cette eau, que l'on renvoie dans la chaudière ou *vaporisateur*, et ainsi de suite indéfiniment.

La pompe qui ramène la dissolution ammoniacale de l'absorbeur au vaporisateur est le seul organe mécanique de l'appareil, et son travail est très faible (1). Les principaux travaux du cycle : la *liquéfaction* et l'*aspiration*, sont effectuées respectivement par le *vaporisateur* et par l'*absorbeur*, dont la combinaison remplace le compresseur des machines précédentes. Il y a donc, théoriquement, une identité parfaite entre les machines à affinité et les machines à compression marchant sans surchauffe : le cycle est le même, l'affinité de l'eau de l'absorbeur pour l'ammoniac remplace l'aspiration mécanique, et l'échauffement direct de la dissolution ammoniacale la compression ; avec ces différences, toutefois, que l'affinité accomplit son travail d'aspiration avec un dégagement de chaleur, tandis que le travail de liquéfaction en absorbe, en apparence inversement à ce qui se passe dans les machines à compression.

D'autres phénomènes accessoires, mais néanmoins importants, achèvent de troubler cette identité théorique. La dissolution ammoniacale n'a pas, dans le vaporisateur, une richesse uniforme ; les parties basses sont très faibles, on les envoie dans l'absorbeur, d'où elles reviennent après s'être enrichies. Mais ces liquides pauvres, très chauds au sortir du vaporisateur, doivent arriver à l'absorbeur aussi froids que possible : on y parvient en les refroidissant, au travers d'un *échangeur de températures*, par la dissolution riche qui retourne de l'absorbeur au vaporisateur ; on utilise ainsi théoriquement toute la chaleur de l'eau du vaporisateur.

Théoriquement, le rendement de l'appareil à absorption doit dépasser celui des machines à compression de la quantité correspondant aux résistances passives de la machine à vapeur et de la pompe de compression ; il devrait aussi diminuer avec la température du réfrigérant, parce qu'il faut chauffer le vaporisateur à une température d'autant plus élevée que sa dissolution est plus pauvre, et que cette richesse s'abaisse avec la pression du réfrigérant à l'entrée de l'absorbeur.

En théorie, la chaleur — en calories négatives — cédée au réfrigérant doit

1. Ces pompes, assez délicates, ont été récemment perfectionnées par M. Neild (brevet anglais 17931 de 1888).

être égale à la différence des chaleurs cédées au condenseur et fournies au vaporisateur ; mais il faut, en pratique, tenir compte de nombreuses causes de déchet, dont les principales sont l'influence de l'eau entraînée avec le gaz ammoniac distillé du vaporisateur et la perte de la chaleur enlevée par le refroidissement du récipient absorbeur, nécessaire pour que la dissolution y soit suffisamment concentrée.

L'eau entraînée nuit au rendement de deux manières : en augmentant inutilement la chaleur fournie à la chaudière de toute la quantité nécessaire pour sa vaporisation, et en diminuant la puissance frigorifique de l'ammoniac, dont elle empêche en partie la volatilisation au réfrigérant. On ne peut guère, avec les meilleures machines, évaluer à moins de 3 pour % la proportion d'eau entraînée, — elle atteint parfois 15 pour %, — et cette faible proportion suffit pour abaisser très notablement le rendement théorique.

La quantité de chaleur qu'il faut enlever à l'absorbeur augmente d'autant celle qu'il faut fournir au vaporisateur ; cette quantité de chaleur est égale à la chaleur d'absorption du gaz ammoniac (515 cal.) diminuée des calories négatives apportées par ce gaz du réfrigérant, ou de la chaleur nécessaire pour l'élever de la température du réfrigérant à la température normale de l'absorbeur.

L'influence de ces deux causes de pertes seules — 3 % d'eau entraînée et le maintien de l'absorbeur à la température du condenseur — suffirait, avec une température de 15° au réfrigérant, à presque décupler la chaleur théorique à fournir à la chaudière (1).

Si l'on ajoute à ces causes de pertes principales celles qui proviennent du rayonnement des appareils, de l'imperfection de l'échangeur de températures et de l'engorgement des serpentins du réfrigérant, plus à craindre avec ce système(2), on ne s'étonne plus de voir le rendement des machines à absorption tomber parfois, malgré leur supériorité théorique, au même niveau, sinon plus bas que celui des machines à compression. D'après une analyse raisonnée de M. Kilbourn (3), les dépenses de vapeur dans les machines à absorption et dans les machines à compression conduites par un bon moteur à condensation seraient dans le rapport de 38 à 23. Les essais de Munich, exécutés, il est vrai, sous l'inspiration de M. Linde, semblent confirmer ces prévisions, car ils indiquent, pour les machines à compression, une dépense de vapeur trois fois moindre que pour les machines à affinité. Nous ne pouvons, tout en faisant nos réserves sur ces chiffres, nous empêcher d'y attacher une certaine importance, confirmée, il semble, par la prépondérance que prennent de plus en plus les machines à absorption, malgré leur caractère mécanique en apparence plus compliqué (4).

1. Ledoux, *Machines à froid*, p. 85.
2. Kilbourn, *Engineering*, 21 octobre 1881, p. 403.
3. *Engineering*, 28 octobre 1881, 427.
4. Gotlieb Behrend, *Eis und Kalteerzeugungs Maschinen*, p. 200 et 301.

En outre, dans la machine à absorption, la circulation d'eau doit emporter non seulement la chaleur de la vapeur d'eau entraînée par l'ammoniac, mais deux fois la chaleur de liquéfaction de ce gaz : une fois au condenseur et une seconde fois à l'absorbeur. Il en résulte qu'il faut dépenser, dans la machine à affinité, environ deux fois plus d'eau qu'avec la machine à compression.

Principaux organes des machines à affinité

Nous allons maintenant passer rapidement en revue les principaux organes des machines à affinité.

Vaporisateur. — La chaudière ou vaporisateur est le plus souvent chauffée au bain-marie, par une circulation de vapeur qui donne un chauffage plus régulier et à l'abri des explosions qui pourraient se produire à la suite des coups de feu provoqués principalement par des incrustations. En France, on préfère, pour le vaporisateur, la position verticale, justifiée, il semble, parce que les parties riches et moins denses de la dissolution ammoniacale se localisent et se concentrent naturellement au haut de la chaudière. En Angleterre et en Allemagne, on préfère la chaudière horizontale surmontée d'un *analyseur* qui permet de donner à l'ensemble de l'appareil un aspect plus compact (*Kropff*, *Pontifex* et *Wood*). Dans tous les cas, le haut de la chaudière, son plan de vaporisation, doit être mis en communication avec le condenseur au travers d'un *rectificateur*, et le bas avec l'*absorbeur* au travers du *régénérateur* ou *échangeur de temvératures*.

L'*analyseur*, interposé entre la chaudière et le rectificateur, consiste le plus souvent en une série de plateaux perforés sur lesquels descendent, sans se mêler au courant ascendant des vapeurs ammoniacales tout en en subissant l'échauffement, l'eau ammoniacale condensée et séparée dans le rectificateur ainsi que la dissolution riche provenant de l'absorbeur. On peut citer parmi les meilleurs appareils de ce genre, ceux de *Reece* (1), *Stanley* (2), *Pontifex* (3), *Beck* (4), *Imbert*.

Le *rectificateur*, qui fait suite à l'analyseur, est composé le plus souvent d'un serpentin pourvu de poches dans lesquelles la vapeur ammoniacale entraînée se recueille à mesure qu'elle se condense en parcourant le serpentin refroidi. L'un des types des rectificateurs de ce genre des mieux étudiés et celui de MM. *Pontifex* et *Wood*, qui prétendent réduire ainsi presque à rien la proportion d'eau entraînée au condenseur (5).

1. Brevet anglais 2891 de 1870.
2. *Ibid.* 3.907 de 1875.
3. *Ibid.* 15064 de 1887.
4. *Ibid.* 11896 de 1886.
5. *Ibid.* 15064 de 1887.

Le *condenseur*, intermédiaire entre le rectificateur et le réfrigérant, ne diffère des appareils analogues des machines à compression que par ses dimensions souvent plus considérables en raison de l'eau entraînée.

Il en est de même du *réfrigérant* placé entre le condenseur et l'absorbeur.

L'*absorbeur*, placé entre le réfrigérant et la pompe de refoulement au vaporisateur ou à l'analyseur, est, au contraire, comme nous l'avons vu, un appareil particulier aux machines à affinité. Il est, en général, constitué par une sorte de condenseur à surfaces, à tubes où à serpentins parcourus par une circulation d'eau froide, recevant par le haut le liquide pauvre du vaporisateur refroidi par l'échangeur de températures, et, en un point intermédiaire, l'ammoniac du réfrigérant (1). L'absorbeur de *Beck* (2) est en deux parties, avec circulation de l'ammoniac en sens inverse de la dissolution faible. Dans l'absorbeur de *Reece*, l'ammoniac arrive, par de petits tuyaux percés en jets multiples, au milieu de la liqueur faible circulant dans de gros tubes en U rafraîchis à l'extérieur par un courant d'eau (3).

C'est, presque toujours, le trop plein de la circulation du condenseur qui sert ensuite à refroidir l'absorbeur.

L'*échangeur de températures*, qui transmet à la dissolution riche venant de l'absorbeur la chaleur de la dissolution pauvre qui s'y rend, est aussi construit presque toujours sur le principe des condenseurs à surfaces, et ne présente rien de bien particulier.

Nous citerons comme variétés des appareils à affinité que nous venons de décrire, ceux de M. *Tellier*, remplaçant l'ammoniac par la méthylamine, avec absorbeur rafraîchi par un courant d'air (4), ou faisant agir l'ammoniac comme force motrice au sortir du condenseur, avant d'arriver au réfrigérant (5). Dans les machines de *Rossi-Beckwith* (6) et d'*Osenbruck* (7) on espère réduire les entraînements d'eau en employant comme liquide absorbeur de la *glycérine concentrée* à 38° Baumé, absorbant de 250 à 300 fois son volume de gaz ammoniac et bouillant à 140° environ. Aucune de ces modifications n'ayant encore subi l'épreuve de la pratique, nous ne pouvons que les signaler sans commentaires.

Nous nous contenterons aussi de rappeler seulement la facilité avec laquelle le principe de l'absorption se prête à la fabrication de petits *appareils intermittents*. Le prototype de ces appareils est celui de Carré, auxquels divers in-

1. Pontifex et Wood.
2. Brevet anglais 11896 de 1886.
3. *Ibid.* 2891 de 1870.
4. *Ibid.* 1730 de 1877.
5. *Ibid.* 6212 de 1888.
6. *Ibid.* 220 de 1881.
7 *Ibid.* 719 de 1886.

venteurs, notamment MM. *Kropff* (1), *Dubern* (2) et *Schmid* (3), ont apporté quelques perfectionnements de détail destinés soit à en faciliter le maniement ou à en assurer la sécurité, soit, à [illegible], croyons-nous, à en étendre l'application à de grandes proportions. Il paraît en être de même du nouvel appareil de M. *A. Perkins*, au sujet duquel on a mené tout récemment une certaine publicité (4).

Principales machines à affinité

Les machines à affinité sont d'invention française. C'est, en effet, à M. *Ferdinand Carré*, l'un des créateurs de l'industrie du froid, que l'on doit la première machine industrielle de ce genre (5) et l'on n'a fait qu'ajouter depuis des perfectionnements de détail à sa remarquable invention, qui fut d'ailleurs récompensée par un brillant succès. On retrouve dans les premières machines de Carré tous les organes essentiels des machines à affinité, dont les formes générales et les fonctions sont très clairement spécifiées par ses brevets. Les machines Carré sont construites en France par MM. *Rouart frères*, et tiennent encore un rang très honorable, sinon le premier rang, parmi les machines à affinité (6).

MM. *Imbert* frères, de Saint-Chamond, construisent aussi des appareils analogues.

Dans ces appareils, le gaz ammoniac volatilisé par une circulation de vapeur à 150° environ, se liquéfie sous une pression de 10 à 12 atmosphères : la dissolution amoniacale de la chaudière renferme environ 1 d'ammoniac pour 4 d'eau. On peut compter, avec un appareil bien conduit, sur un rendement d'environ 20 kilogrammes de glace par kilogramme de charbon (7). MM. *Rouart* frères auraient même obtenu jusqu'à 28 kilogrammes de glace par kilogramme de charbon.

En 1870 et 1875, MM. *Reece* et *Frank Stanley* (8) introduisirent dans les machines à affinité quelques perfectionnements de détail importants, notamment la déshydratation de l'ammoniac poussé aussi loin que possible par un analyseur analogue aux rectificateurs des appareils à distiller.

1. Brevet anglais 2740 de 1879.
2. *Ibid.* 3153 de 1877.
3. *Ibid.* 16074 de 1885 et 16293 de 1888.
4. *Engineering* 8 mars 1887 et *The Engineer*, 8 mars 1887. Brevet anglais 2471 de 1887.
5. Brevets anglais 2503 de 1860, 3422 de 1872.
6. *Génie civil*, 21 septembre 1889, p. 492.
7. *Engineering*, 26 juillet 1889, p. 100. — *Wolson-Wood*, "Thermodynamics" p. 356. (Essais de Denton.)
8. Brevet anglais 2891 de 1870, et 3907 de 1875.

MM. *Pontifex et Wood* de Londres ont, après avoir longtemps fabriqué les machines de *Reece*, considérablement perfectionné pour leur part les appareils à absorption par d'ingénieuses modifications de détail (1). Il en est de même, en Allemagne, pour les appareils de *Koch-Habermann* (2) et de *Kropf*, où tous les serpentins sont remplacés par des tubes droits (3).

Appareils Carré, Mignon et Rouart

Ces appareils figuraient à l'Exposition : nous en empruntons la description générale à un mémoire publié par M. Rouart dans les comptes rendus de la Société des Ingénieurs civils, en 1867.

« L'*appareil intermittent* se compose de deux réservoirs solidement construits, d'inégale capacité : le plus gros s'appelle *chaudière*, le plus petit *congélateur*. Dans la chaudière, jusqu'aux 3/4 de sa hauteur, se trouve une solution de gaz ammoniac dans l'eau, marquant de 28 à 29° degrés à l'aréomètre de Cartier. Un tube de communication réunit la chaudière au congélateur ; il porte un renflement qui renferme deux soupapes ouvertes ouvrant en sens inverse : l'une destinée au dégagement du gaz, l'autre à son retour. La chaudière est mise sur le feu, et le congélateur dans l'eau la plus froide qu'on ait à sa disposition ; le gaz ammoniac abandonne l'eau qui le tenait en dissolution, pour se rendre dans le congélateur. Au bout d'un certain temps de chauffage, vers 130 à 140° centigrades, la presque totalité du gaz ammoniac a passé dans le congélateur, où il s'est liquéfié sous l'influence de la pression et du refroidissement ; de sorte qu'à ce moment, on a, d'une part, une chaudière contenant de l'eau presque pure à une température assez élevée, et, d'autre part, un congélateur contenant une quantité notable de gaz liquéfié qui, comme on le sait, bout à une température de 40° au-dessous de zéro sous la pression ordinaire. Il suffira de provoquer convenablement son évaporation pour obtenir, dans le congélateur, cette température et un très grand nombre de calories négatives qu'on utilisera suivant ses besoins. Pour arriver à ce but, on refroidit la chaudière par un courant d'eau froide ; la tension, qui y était de 8 à 10 atmosphères, s'abaisse immédiatement et, sous l'influence de ce vide relatif, commence la distillation du gaz ammoniac. Elle s'arrêterait bientôt si on ne détruisait à chaque instant les vapeurs qui se dégagent ; elles sont, à cet effet, amenées par un tuyau plongeur au fond de la chaudière, où elles sont absorbées par le liquide qui y est contenu, de manière que quand l'ébullition du gaz liquéfié a cessé, l'appareil se trouve ramené à ses conditions originaires, c'est-à-dire à une chaudière contenant de la solution ammoniacale concentrée et froide et un congélateur prêt à recevoir une nouvelle condensation.

1. *Engineering*, 1er avril 1887. Brevet anglais 15064 de 1887.
2. Schwartz, Eismaschinen, p. 235.
3. Brevet anglais 2740 de 1879.

« Ces appareils, extrêmement simples, peuvent s'utiliser dans un très grand nombre de cas. Rien ne limite leurs dimensions ; néanmoins il y a dans l'intermittence de leur travail des conditions qui ne se prêtent pas facilement à de grandes fabrications industrielles.

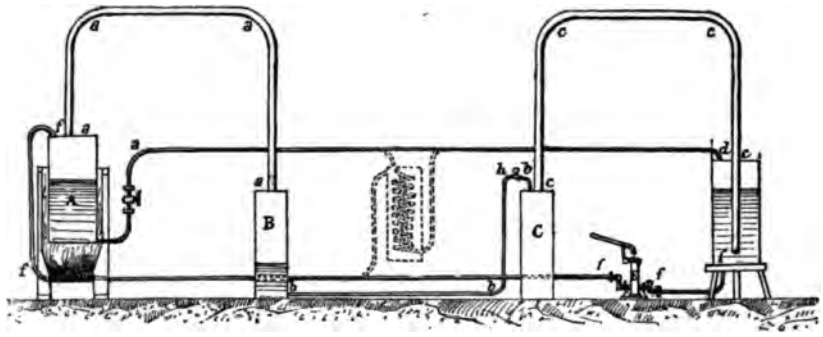


Fig. 128. — Appareil Carré.

A, chaudière. B, liquéfacteur. C, congélateur. D, absorbeur. E, échangeur de température. F, pompe de circulation.

« C'est ce qui a amené M. Carré à inventer les *appareils continus*, qui ne sont que le développement logique de ceux que je viens de décrire.

« Qu'on veuille bien remarquer que le travail des appareils intermittents s'accomplit en deux phases successives : le chauffage et la congélation, — et que, pendant ces deux périodes de but inverse, chacun des organes de l'appareil accomplit deux fonctions totalement inverses. Ainsi, dans la première période, la chaudière distille du gaz ammoniac, le congélateur le condense ; — dans la seconde période, la chaudière condense le gaz ammoniac distillé par le congélateur.

« Pour créer un appareil dont le travail soit continu, il faudra lui donner quatre organes où s'accompliront simultanément les opérations qui s'exécutent successivement dans les deux organes de l'appareil intermittent. Ainsi, cet appareil devra posséder une chaudière A (fig. 128) qui distillera du gaz ammoniac, un liquéfacteur B qui le condensera, un congélateur ou volatilisateur C qui le distillera et enfin un absorbeur D qui le recueillera. — Ces différents organes seront mis en communication par : 1° un tuyau *aa*... allant de la partie supérieure de la chaudière au sommet du liquéfacteur ; 2° un tuyau *bb*... partant du bas du liquéfacteur pour se rendre au haut du congélateur ; 3° un tuyau *cc*... partant du sommet du congélateur pour se rendre au vase à absorption ; 4° un tuyau *dd*... partant du fond de la chaudière pour se rendre au vase à absorption et 5° un tuyau *ff*... allant du fond du vase à absorption au sommet de la chau-

dière. Cet appareil se complétera par une pompe F. placée sur le parcours du tuyau *ff*... qui va du vase à absorption à la chaudière ; un robinet *g*, placé sur le trajet du tuyau *dd*... et enfin un robinet *h*... placé sur le parcours du tuyau *bb*...

« Pour se rendre compte des différentes évolutions que vont effectuer, à travers ces organes, le gaz ammoniac et l'eau successivement combinés et séparés, il faut remarquer :

« Premièrement.— Que la distillation du gaz ammoniac dans la chaudière A et sa condensation dans le liquéfacteur B s'effectueront sous une pression entretenue constante d'environ 10 atmosphères.

« Secondement. — Que sa volatilisation et son absorption s'effectueront sous une pression entretenue constante d'environ 1 atm. 1/2, suffisante pour obtenir, dans le congélateur, une température déterminée et, dans le vase à absorption, une concentration convenable de la solution ammoniacale.

« Troisièmement.—Que, la distillation de la solution ammoniacale dans la chaudière A s'effectuant doucement en vase clos, il se produira dans cette distillation une décantation qui, pour ne pas être très sensible, fera néanmoins que la solution ammoniacale la plus appauvrie se trouvera à la partie inférieure de la chaudière.

« De ces données, on conclut : 1° que le gaz ammoniac circule sans obstacle de la chaudière au liquéfacteur ; 2° qu'il se rendrait immédiatement du liquéfacteur au congélateur. si on n'avait soin d'interposer sur son parcours le robinet *h* pour régler son écoulement ; 3° que le gaz volatilisé tend à se répandre du congélateur où il se produit au vase à absorption où il se détruit ; 4° que le liquide pauvre voyagerait immédiatement de la chaudière dans le vase à absorption sans l'interposition du robinet *g* ; 5° que l'enceinte du vase à absorption étant à une pression inférieure de 8 atm. 1/2 à celle de la chaudière, la solution ammoniacale riche qui s'y formera, ne pourra rentrer dans la chaudière pour y subir une nouvelle distillation, que par l'intermédiaire d'une pompe de tout autre organe de restitution.

« Pour conduire ces appareils, il faudra donc : chauffer la chaudière afin d'effectuer la distillation du gaz ammoniac et sa liquéfaction ; régler le robinet d'écoulement du gaz liquéfié dans le congélateur, ainsi que le robinet d'écoulement du liquide pauvre dans le vase à absorption ; enfin, faire marcher la pompe de manière à établir un parfait équilibre entre la quantité de solution ammoniacale reconstituée dans le vase à absorption et la quantité de solution décomposée dans la chaudière.

« Le réglage respectif des deux robinets de gaz liquéfié et de liquide pauvre est toute la marche de l'appareil, car c'est lui qui détermine la pression du vase à absorption, d'où résulte celle du congélateur, et, par suite, l'ébullition du gaz ammoniac à une température déterminée.

« L'appareil se complète par différents organes secondaires ayant pour but d'en rendre le fonctionnement plus commode et plus économique. Ainsi, le gaz liquéfié, avant de s'écouler dans le congélateur, s'accumule dans un récipient garni d'un tube indicateur de niveau, qui permet de juger continuellement la quantité de gaz dont on dispose, et, par suite, aide au réglage. Le liquide pauvre qui doit arriver refroidi dans le vase à absorption obtient ce refroidissement dans un échangeur de température analogue à ceux que je vous ai antérieurement décrits, et au moyen duquel il réchauffe le liquide riche qu'on prend froid au vase à absorption, et qu'on a intérêt à renvoyer chaud dans la chaudière ; cet appareil E, figuré en ponctué sur le dessin, se trouve placé sur le trajet du tuyau *dd*...

« J'ai insisté plus haut sur l'importance du réglage respectif des robinets d'écoulement. On comprendra aisément combien ces organes sont dignes de fixer l'attention, quand on voudra bien se reporter au très simple calcul que voici :

« L'expérience démontre que pour produire 2,500 calories négatives ou à peu près 25 kilogrammes de glace à l'heure, il faut liquéfier environ 10 litres de gaz, qui s'écoulent du liquéfacteur sous une pression différentielle d'environ 8 atmosphères 1/2, c'est-à-dire comme s'ils sortaient par un orifice en mince paroi placé au fond d'un vase dont la hauteur serait de 88 mètres. Dans ces conditions, la vitesse d'écoulement serait, d'après la formule de Toricelli, d'environ 40 mètres à la seconde ; il en résulte pour l'orifice des dimensions pratiquement insaisissables. Bien que l'organe d'écoulement dont nous nous servons n'ait pas encore atteint une perfection idéale, je vous donnerai néanmoins sa description, parce qu'il donne de bons résultats pratiques. Il se compose d'un tube de fer, fendu suivant deux génératrices opposées et entrant très exactement à frottement dur dans une douille placée au fond d'une boîte hermétique où s'accumule le gaz liquéfié. Ce tube est relié à une tige de fer dont la partie inférieure porte une embase qui vient écraser une rondelle d'étain sur l'orifice de la douille, de manière à assurer l'étanchéité de la fermeture.

« Le gaz liquéfié s'écoule quand le tube sort de la douille, et son écoulement est réglé par la grandeur de la lumière découverte. Le mouvement du tube est produit par celui de la tige à laquelle il est lié, et dont l'extrémité, terminée en vis micrométrique, est mise en mouvement par une manivelle formant écrou ; un tube de caoutchouc, lié d'une part à la tige mobile, et, d'autre part, au couvercle supérieur du robinet, permettra le jeu de l'appareil sans donner issue au gaz ammoniac.

« Je n'entreprendrai pas de vous donner tous les détails de construction de ces appareils ; ils sont fort nombreux et ont généralement donné lieu à d'assez notables difficultés tenant, d'une part, aux grandes pressions auxquelles sont soumis les organes, et, d'autre part, à la subtilité du gaz ammoniac et à ses propriétés.

« Avant de terminer cette rapide exposition, je dois vous faire remarquer que

le principe sur lequel s'appuient les appareils de M. Carré est général, c'est-à-dire qu'il ne s'applique pas seulement à la dissolution du gaz ammoniac dans l'eau, mais qu'il permet de construire tous les appareils mettant en usage tous les corps susceptibles d'affinité à de basses températures, et de dissociation à des températures plus élevées. »

Machine de MM. Imbert frères

Les machines à affinité de MM. Imbert frères, de St-Chamond, figuraient aussi à l'Exposition. La figure ci-jointe et sa légende suffisent pour faire comprendre la marche générale de cet appareil.

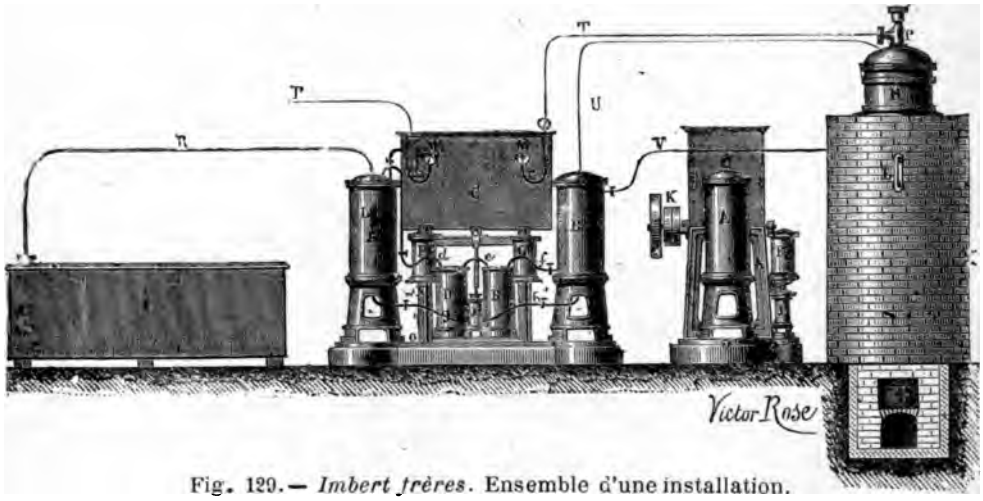


Fig. 129. — *Imbert frères*. Ensemble d'une installation.

H, vaporisateur. B, condenseur. L, liquéfacteur. I, bac à glace. C, absorbeur. K, J, pompe d'ammoniaque.

Machines de MM. Pontifex et Wood (1)

La figure 130 représente l'ensemble d'une machine de MM. Pontifex et Wood.

La dissolution ammoniacale est chauffée dans une chaudière horizontale par la condensation d'un courant de vapeur qui traverse une série de tubes plongés dans la chaudière. Les vapeurs ammoniacales passent de la chaudière dans un analyseur à plateau A, puis dans un condenseur C, dont les tubes sont entourés par une circulation d'eau, et du bas duquel l'ammoniac liquéfié tombe dans le récipient L, qui l'amène au robinet de détente *d* du réfrigérant R. Dans ce réfrigé-

1. *Engineering*, 1er avril 1887, p. 293. Brevet anglais 15064 de 1887.

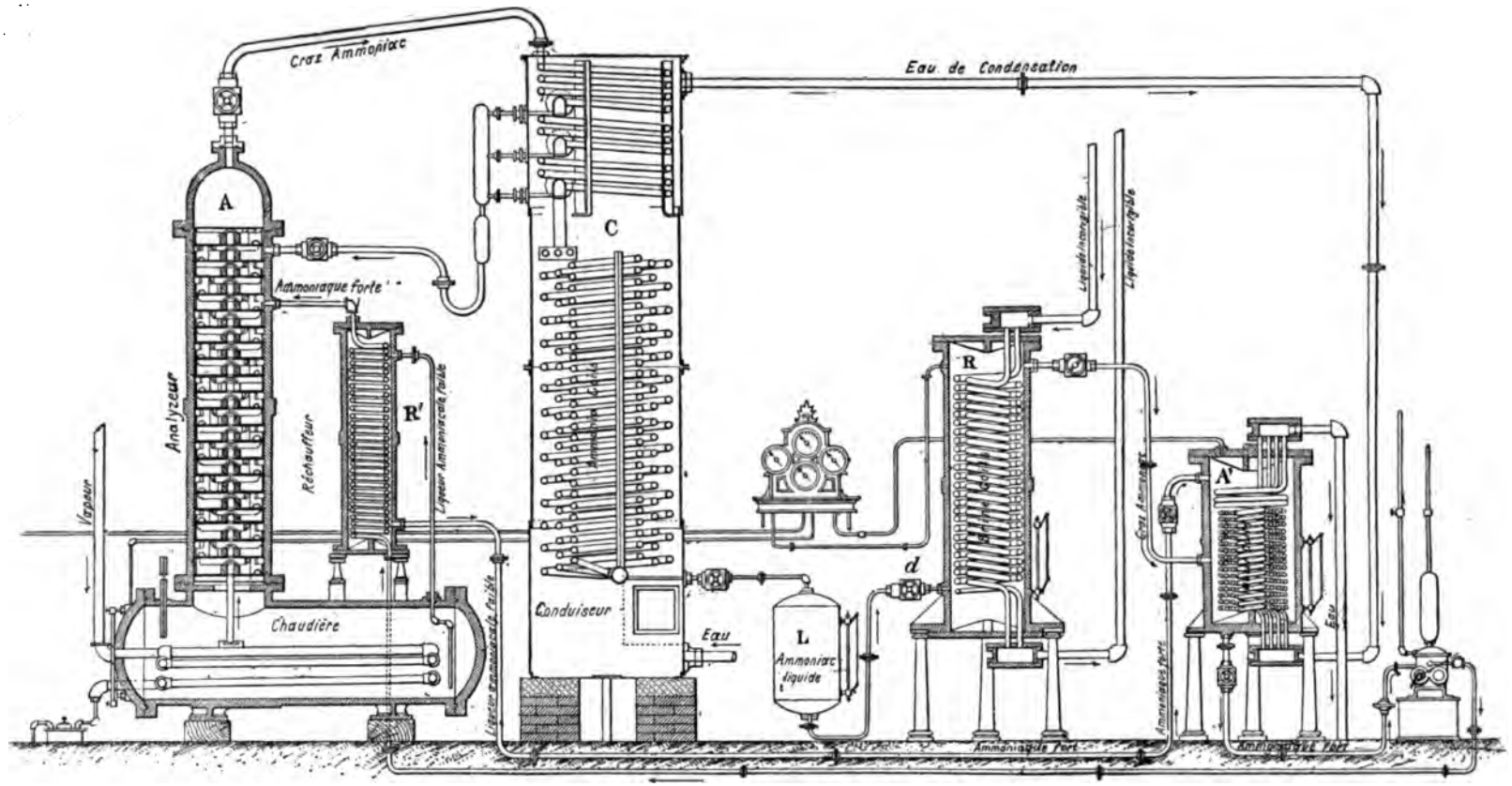


Fig. 130. — *Pontifex et Wood*. ensemble d'une installation

A, analyseur à plateaux. (Fig. 131). C, condenseur rectificateur. (Fig. 132). L, liquéfacteur. R, réfrigérant. A, absorbeur. (Fig. 135). R, réchauffeur *d*, robinet de détente (Fig. 133). *p*, pompe de circulation.

rant, l'ammoniac se détend autour d'un serpentin parcouru par un courant de liquide incongelable qui sert de véhicule au froid produit par la vaporisation de l'ammoniac. Au sortir du réfrigérant, l'ammoniac gazeux et froid arrive, dans l'absorbeur A', au contact d'un arrosage d'eau constamment rafraîchie par des serpentins que traverse l'eau même du condenseur C. L'ammoniac se dissout dans l'eau de l'absorbeur en formant une dissolution ammoniacale concentrée et

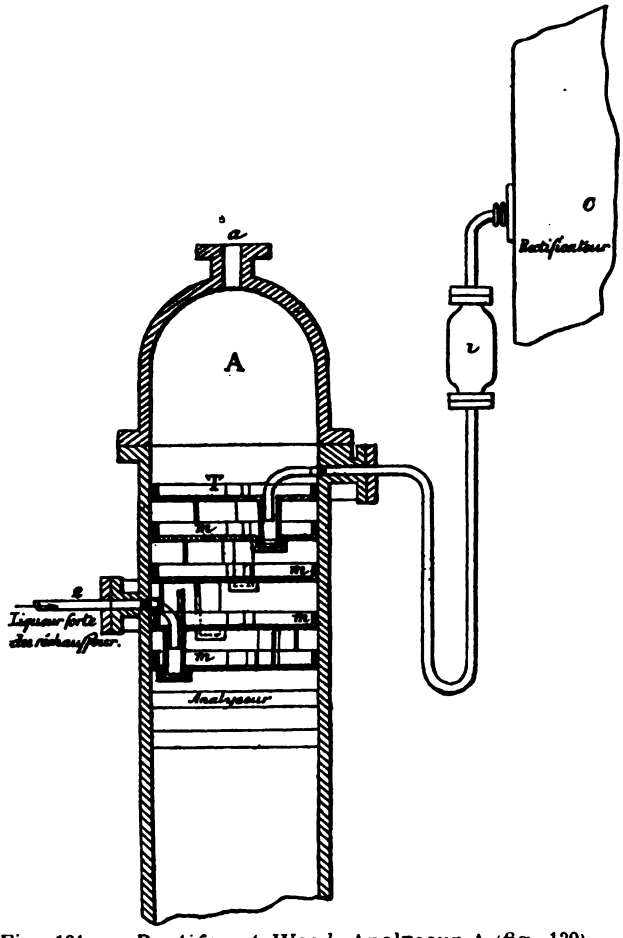


Fig. 131. — *Pontifex et Wood*. Analyseur A (fig. 130).
m m ..., plateaux recevant la purge ammoniacale du rectificateur C en *i* (fig. 131) et, en *r*, la liqueur ammoniacale concentrée venant du réchauffeur R' (fig. 130). Ces liquides tombent en cascade des plateaux *m m* dans la chaudière de vaporisation.

froide, que la pompe *p* refoule à l'analyseur A, autour du serpentin du réchauffeur R', parcouru en sens contraire par la dissolution ammoniacale faible, qui va du bas de la chaudière à l'absorbeur.

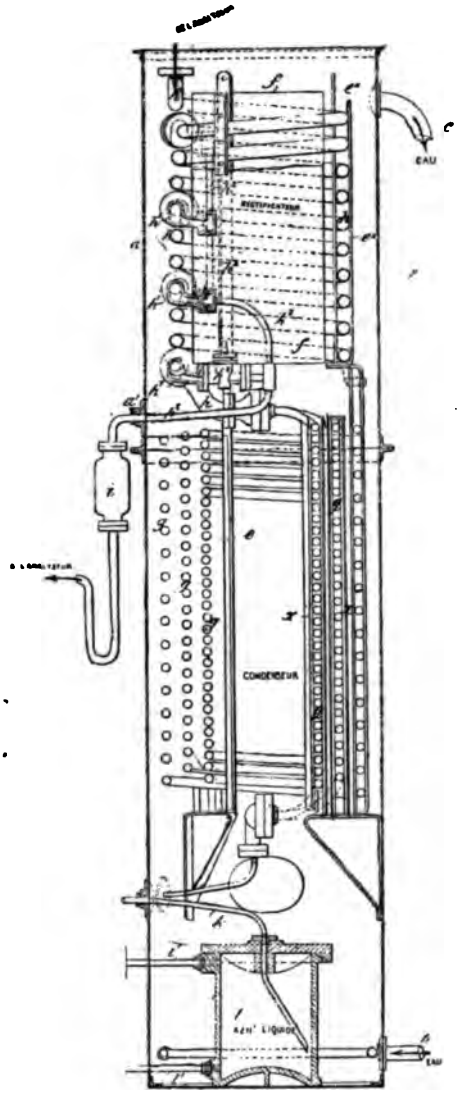
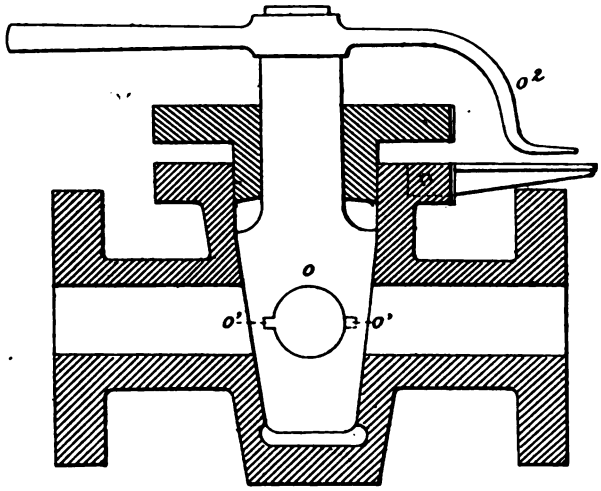


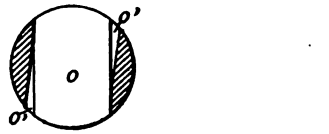
Fig. 132.— *Rectificateur de Pontifex et Wood.*
L'ammoniac venant de l'analyseur arrive en *h* dans le serpentin du rectificateur pourvu de poches *h'*, conjuguées par des tubes h_2 qui en dirigent l'eau chargée d'ammoniac en *i*, d'où elle repasse dans l'analyseur : un robinet h^4 permet d'isoler *i* de la dernière poche *h'*.
Du rectificateur, l'ammoniac anhydre pénètre dans le triple serpentin *g* du condenseur, d'où il tombe, par *k*, liquéfié dans le récipient *l*, à tubes de niveau *l' l'*.
L'ensemble du condenseur, du rectificateur et du liquéfacteur est renfermé dans une bâche *a*, pourvue des supports *xef*, nécessaires aux serpentins, et refroidie par une circulation d'eau ascendante suivant *bc*.

Nous allons maintenant décrire avec quelques détails les principaux organes de la machine de MM. Pontifex et Wood :

L'analyseur A est représenté par la figure 131. On voit comment la purge d'ammoniac du condenseur rectificateur *i* et la liqueur ammoniacale forte amenée du réchauffeur R' par le tuyau *r* tombent d'un plateau *m* à l'autre, en sens contraire des vapeurs ammoniacales qui montent de la chaudière vers le condenseur en A *a*, et s'enrichissent par l'évaporation des plateaux *m*.

Les vapeurs ammoniacales parcourent, avant d'entrer au condenseur proprement dit C (fig. 130 et 132), un rectificateur placé au-dessus du condenseur, et dont le serpentin *h* porte un certain nombre de poches *h'*, *h'*..., où les vapeurs ammoniacales déposent une grande partie de leur eau entraînée. Un tuyau collecteur h_2 conduit ces eaux dans le collecteur *i*, qui les ramène à l'analyseur. A la suite du rectificateur, vient le condenseur proprement dit, à trois serpentins *g*, aboutissant, par le tuyau *k*, au récipient d'ammoniac liquide, ou liquéfacteur *l*, pourvu de tubes de niveau *l'l*. Les serpentins du rectificateur et du condenseur sont maintenus et consolidés par des membrures *f.e.x*. La circulation de l'eau autour de ces serpentins s'effectue de bas en haut, suivant *be*.





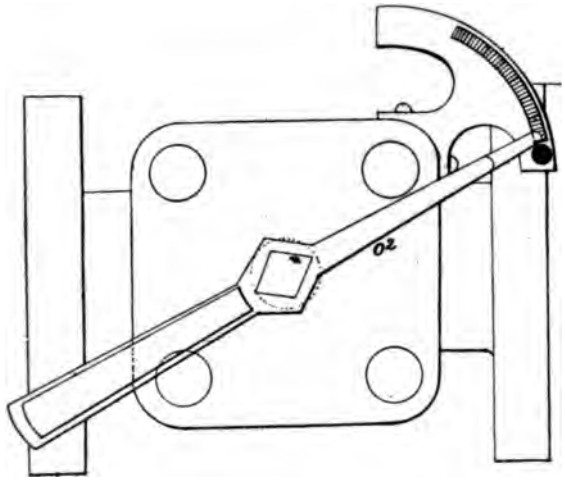


Fig. 133 et 134.—*Pontifex et Wood.*

Robinet du détendeur interposé en *d* (fig. 130) entre le liquéfacteur et le réfrigérant. *o'o'* saignées obliques du trou *o* permettant de graduer très exactement la détente. o_2 index gradué.

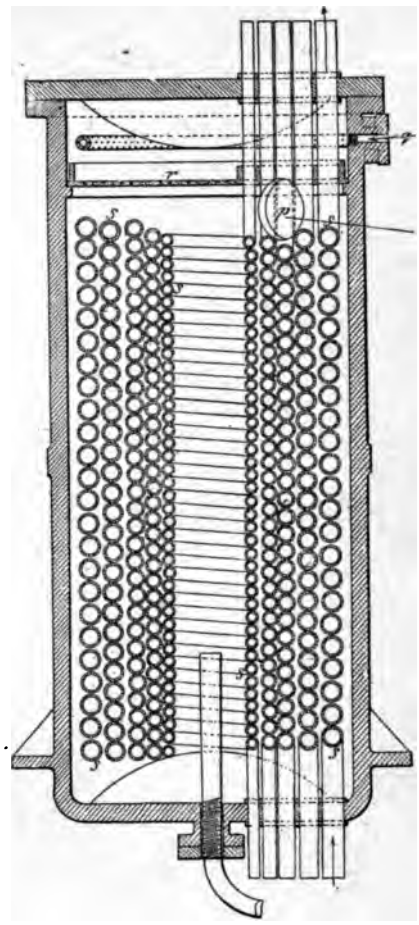


Fig. 135 et 136. — *Pontifex et Wood.* Absorbeur A' (fig. 130).

S, serpentins parcourus de bas en haut par une circulation d'eau froide. *q*, tuyau perforé amenant l'ammoniaque faible et froide du réchaufleur R (fig. 130) au-dessus de la plaque perforée *r*. *p*, arrivée du gaz ammoniac venant du réfrigérant R.

Le robinet détendeur *d* (fig. 133 et 134) est percé de trous obliques *o'o'*, disposés de manière à permettre d'en mieux graduer l'ouverture, et pourvu d'un index gradué *o*².

L'absorbeur A' est représenté en détail par les figures 135 et 136. L'ammoniac détendu du réfrigérant R pénètre par *p* autour des serpentins *s*, à quatre sections de diamètres décroissant vers le centre, et parcourus de bas en haut par une circulation d'eau froide. La dissolution ammoniacale faible et froide, qui vient du réchauffeur R', pénètre au haut de l'absorbeur par le tuyau perforé *q*, sur la tôle perforée *r*, qui la distribue en pluie fine au droit de l'arrivée de l'ammoniac en *p*.

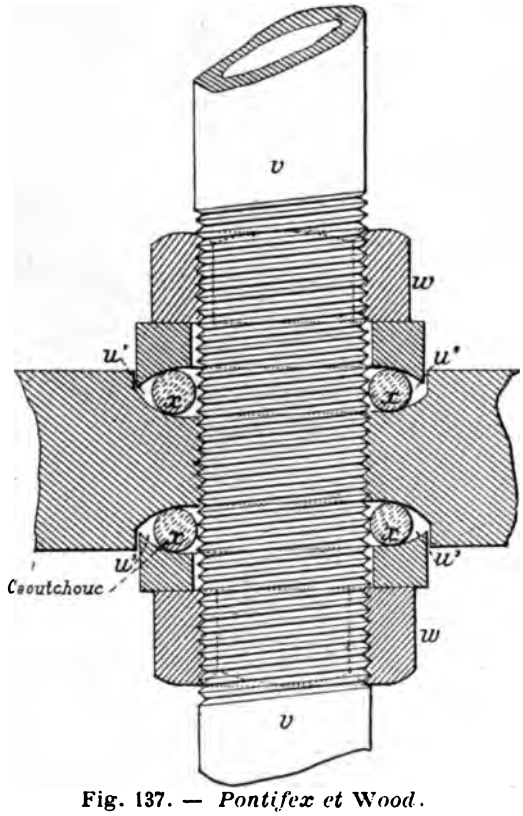


Fig. 137. — *Pontifex et* Wood.
Détail des joints d'un serpentin *v v* avec sa tôle. *w* écrou serrant les rondelles *u'* sur les caoutchoucs *x*.

La figure 137 indique le détail du joint d'un bout de serpentin *v* avec la tôle *u* par le serrage des rondelles *u'* sur les caoutchoucs *x*, au moyen des écrous *w*. — Ces joints tiennent parfaitement l'ammoniac aux hautes pressions.

Machines de Perkins (1)

La machine de Perquins figurait à l'Exposition dans la section anglaise : c'est en réalité une modification des appareils intermittents de Carré.

La figure 138 représente un des éléments de la machine de Perkins. L'ammoniac, volatilisé en A par un bec Bunsen, passe, par le tube à enveloppe d'eau E, dans le liquéfacteur F, qui contient de l'eau jusqu'au niveau du tube G. D'après M. Perkins, l'ammoniac liquéfié, plus léger que l'eau, flotte à sa surface et l'ex-

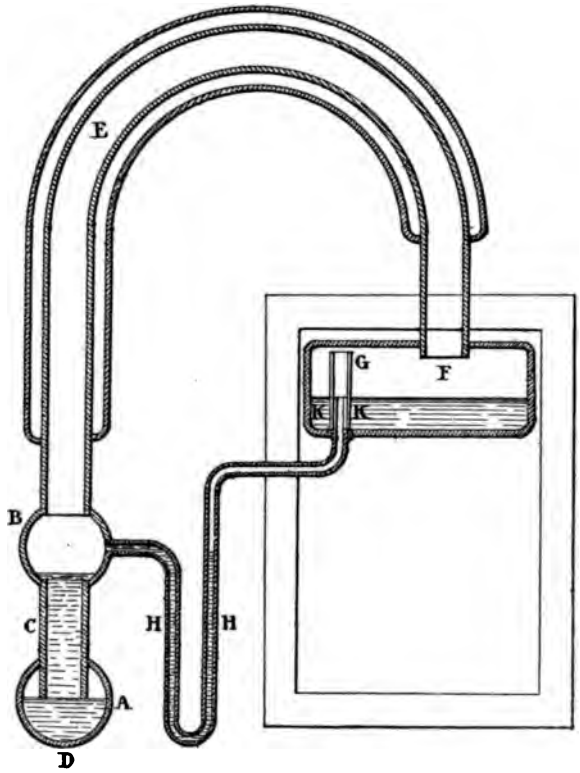


Fig. 138. — *Perkins*. Appareil élémentaire.
A B C, vaporisateur chauffé en D, E tuyau distillant en F l'ammoniac vaporisé en B. G K H syphon de retour de l'ammoniac de F en B.

pulse progressivement, par les trous K et le syphon H H, au vaporisateur (B C A) où l'ammoniac entraîné avec l'eau se volatilise de nouveau. Dès que toute l'eau de F a ainsi repassé par (A B E F), on cesse de chauffer en D : l'appareil se refroidit rapidement par la circulation d'eau E et par un arrosage de B : l'am-

1. *Engineering* et *The Engineer*, 8 mars 1887. Brevet anglais 2471 de 1888.

moniac liquide se vaporise et distille dans le vide de F en A, en produisant un froid qui peut descendre, d'après M. Perkins, jusqu'à — 40°.

La figure 139 représente la disposition générale des grands appareils de M. Perkins. — Le récipient F de l'appareil élémentaire précédent est remplacé par une série de tubes C, placés au haut de la chambre A, et reliés chacun à un bout, par un tuyau D, avec un tube horizontal E aboutissant, par un petit tuyau F, au vaporisateur correspondant G. — Les autres extrémités des tubes C sont reliés aux tubes E par des tubes en U, K, qui les traversent à moitié, et sont entourés de gaînes J, ouvertes par le bas. — Ces tubes jouent le rôle du syphon H C de l'appareil précédent. — La dissolution ammoniacale est chauffée en G par une circulation d'eau chaude H; Ces tubes H traversent les tubes G et se rattachent au serpentin H' chauffé par le foyer J. L'ammoniac volatisé en G se condense en C, puis s'en revolatilise en y produisant du froid lorsqu'on cesse de chauffer en H et qu'il revient en G. La vapeur entraînée retourne en G par les tubes-syphons K. — Les tubes de circulation d'eau H sont pourvus de robinets permettant de chauffer à volonté l'un ou l'autre des vaporisateurs G.

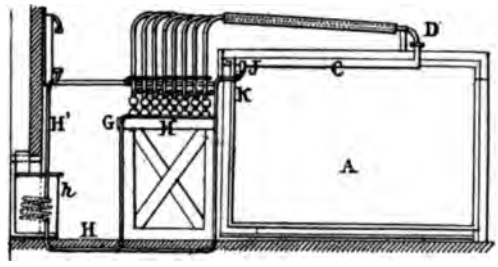


Fig. 139. — *Perkins. Ensemble d'un grand appareil.*

A, réfrigérant. C, tubes liquéfacteurs reliés aux vaporisateurs G d'une part, par les tubes F et E, et d'autre part par le syphon J K. H' H. circulation, autour de G, d'eau chauffée en *h*.

Nous ne possédons aucun renseignement sur le rendement de cet appareil, connu en Angleterre sous le nom d'*Arctos*.

Applications des machines frigorifiques

Les applications du froid aux industries les plus diverses sont déjà très nombreuses et se multiplient de jour en jour.

L'emploi du froid est tout indiqué pour les industries qui utilisent les fermentations dont il faut, en certains moments, arrêter ou modérer le développement : tel est le cas des fromageries (1) des magnaneries, des sucreries, pour la conservation des jus, des fabriques de colles et de gélatine et des brasseries à fermentation basse (pl. 7-8). Dans cette dernière application, des plus importantes, on utilise le froid de deux manières : par l'application directe de la glace et par le refroidissement des caves et des cuves au moyen de circulations de liquide incongelable et d'eau, sortes de volants de froid qui atteignent parfois des proportions gigantesques (25 à 30 kilomètres) (2).

On peut citer, comme industries similaires, la conservation des vins et la fabrication des eaux gazeuses (3).

Parmi les *industries chimiques* qui utilisent le froid, il faut citer la fabrication des bougies, les margarines (4), du chocolat (5), de la paraffine (6), la concentration des eaux mères et la cristallisation des dissolutions salines (7).

On a bien essayé, mais sans succès, financier du moins, l'application des machines à froid à la création de petits lacs de patinage artificiels (8).

Une application plus récente et plus importante est celle de M. Poetsh, pour le *fonçage des puits* en terrains aquifères inconsistants, que l'on transforme par la congélation en une masse facile à traverser (9). Le capitaine Lendmarck a appliqué avec succès, en 1886, une méthode analogue au percement d'un tunnel à Stockholm (10). Le froid, bien que très intense, n'exerce aucune influence notable sur la solidité des cuvelages en bois, en fonte, et même en maçonnerie.

1. *Fixary*. Nouveaux appareils frigorifiques (Paris, Joussens, 1880).
2. Schwartz. G. Behrend « Eismaschinen ». P. Boulin « Fabrication de la bière ».
3. Michotte et Guillaume. *Traité de la Fabrication des eaux gazeuses*. Hetzel. 1889.
4. Fondoir central de Paris (Fixary).
5. Usine de Noisiel (Giffard).
6. Kirk, *inst. of Civil Eng.*, 20 mars 1884. *Revue industrielle*, 19 mars 1889.
7. Merle et Cie à Solindres pour les marais salants.
8. West et du Vallon. Brevet anglais 2239 de 1875. Mackay et Rae. Brevets anglais 1073 de 1875, 789 de 1876. Gamgel. Brevets anglais 411, 4176 de 1876.
9. *The Engineer*, 30 novembre 1883, p. 417. *Génie civil*, 17 mai, 12 sept. 1884. *Annales des Mines*, juillet 1885, janvier 1887. (Mémoires de MM. Lebreton et Alby).
10. *Inst. of Mechanical Engineers*, mai 1886, p. 237.

Nous ne pouvons guère qu'indiquer ces diverses applications du froid, et ne donner quelques détails que sur les trois applications suivantes :

La *fabrication de la glace;*

La *fabrication de l'air froid;*

La *conservation des viandes* et denrées alimentaires.

Ces trois applications, les plus importantes, comprennent d'ailleurs, comme dérivées, presque toutes celles que nous venons de signaler.

Fabrication de la glace

L'application la plus importante des machines frigorifiques est la fabrication de la glace.

La glace se fabrique en congelant l'eau renfermée dans des bacs cloisonnés fixes, à l'intérieur des parois desquels circule un liquide incongelable, ou dans des mouleaux mobiles, plongés dans un liquide traversé par des serpentins que parcourt le gaz réfrigérant. Les mouleaux mobiles, plus économiques et d'un maniement plus commode, sont de beaucoup les plus employés. On les fait indifféremment, en tôle étamée ou galvanisée.

On distingue dans le commerce deux sortes de glace : la *glace transparente* et la *glace opaque*. Cette dernière, préférable pour l'alimentation puisqu'elle doit son opacité à la présence d'un excès d'air, n'est pourtant admise que dans les usages industriels, où son air est parfois nuisible, et pour lesquels elle présente, en raison de sa plus grande légèreté, l'inconvénient de fondre plus vite et de moins refroidir, à volume égal, que la glace transparente. Ajoutons qu'il importe, pour la consommation et pour les usag es médicaux, de n'employer comme eaux servant à la fabrication de la glace que des eaux filtrées et débarrassées, autant que possible, par la chaleur ou autrement, de leurs impuretés organiques (microbes, etc.), qui ne sont pas rendus inoffensifs par la congélation [1].

Les principaux procédés employés pour produire de la glace transparente sont au nombre de cinq :

La congélation lente ;

La congélation dans le vide ;

L'agitation de l'eau pendant la congélation ;

L'ébullition ou la distillation de l'eau privée d'air ;

La congélation de l'eau provenant de la condensation de la vapeur d'échappement.

1. *Revue scientifique*, 3 septembre 1887, les « bactéries de la glace» par M. de Varigny.

La congélation lente, dans un bain à 3° environ, imite le procédé de la nature et donne des résultats excellents. D'une simplicité parfaite, elle présente l'inconvénient d'exiger des bacs énormes, coûteux et multipliant les chances de fuites.

Le vide, combiné parfois avec l'ébullition (1) ou l'agitation (2), donne aussi une glace très belle; mais il exige des appareils coûteux, compliqués et d'un maniement difficile; aussi est-il presque abandonné.

L'agitation exige aussi des mécanismes souvent encombrants, coûteux et compliqués, On peut le produire, soit dans les mouleaux [à l'intérieur (3) ou à la surface (4) de l'eau à congeler, par des vannes (5), des ailettes (6) ou des pompes de circulation (7)], soit dans des compartiments fixes, autour de leurs cloisons, par des moyens analogues, principalement par des pompes de circulation (8), soit, enfin, par l'agitation même des mouleaux au sein du liquide incongelable (9). Les inconvénients de ces solutions mécaniques, qui ne procurent pas toujours une glace très belle, sont tels qu'elles ne sont guère répandues, malgré leur grand nombre et le caractère ingénieux de quelques-unes d'entre elles.

Il n'en est pas de même de la *distillation* et de *l'ébullition* de l'eau à congeler, coûteuses si on les opère isolément, mais économiques en combustible si on les obtient par une chaudière auxiliaire à surpression, ou en utilisant la vapeur d'échappement du moteur.

La première solution est celle de *Linde* (10) ; il chauffe la chaudière du moteur, à grandes surfaces évidemment, par la condensation de la vapeur d'une chaudière de distillation portée à une pression plus élevée ; cette eau, condensée sous pression, passe, par un réducteur, dans un récipient ouvert à la pression atmosphérique, où elle entre en ébullition en perdant son air, puis elle est refoulée aux mouleaux au travers d'un réchauffeur d'alimentation dans lequel elle se refroidit en cédant sa chaleur à l'eau d'alimentation des deux chaudières. Cette solution, très rationnelle, exige l'installation d'appareils encombrants et coûteux, mais elle donne de l'eau distillée pure, sans graisse, et privée d'air.

1. Edwards, Brevet anglais 3123 de 1881. — Raydt, Brevet anglais 3347 de 1885.
2. Gamgee, Brevet anglais 4064 de 1877.
3. Young, Brevets anglais 826 de 1879, 987 de 1880, 1460 de 1882. — Linde Brevet anglais 9612 de 1885.
4. Nightingale, Brevet anglais 13923 de 1884.
5. Osenbruck, Brevet anglais 954 de 1882. Schwarz (*Eismaschinen*, p. 404).
6. Mutter, Brevet anglais 736 de 1883.
7. Gorman, Brevet anglais 2353 de 1879. — Puplett, Brevet anglais 12542 de de 1884.
8. Skene, Mackay, Gorman et Willcox, Brevets anglais 1515 et 2343 de 1879, 3038 de 1880, 553 de 1881.
9. Dowrie, Ingram, Rankin, Brevets anglais 4817 de 1881, 14989 et 15437 de 1885.
10. Brevet anglais 16270 de 1886. — Voir aussi le brevet français n° 118846 de MM. Mignon et Rouart, en date du 1er mai 1879.

Lorsqu'on emploie pour faire la glace la vapeur d'échappement de la machine motrice, qui suffit généralement à 15 ou 20 % près, il faut au contraire employer pour la débarrasser de sa graisse, des dispositions spéciales. Dans l'appareil de M. *de Stoppani* (1) (fig. 141), la vapeur d'échappement, déjà condensée en partie par une injection complémentaire d'eau épurée, traverse, avant d'aller se condenser définitivement autour des tubes d'un condenseur à surfaces, un séparateur constitué par une série de tôles perforées disposées en chicanes de manière à contrarier son cours, et le long desquelles la vapeur abandonne l'huile entraînée. L'air est enlevé par une pompe à air, qui maintient constamment le vide au-dessus du niveau de la vapeur précipitée dans le condenseur à surface : cette eau privée d'air est ensuite pompée dans un réservoir ou accumulateur aboutissant au remplissage des mouleaux. On peut employer pour le condenseur à surfaces la même eau que pour le refroidissement du condenseur d'ammoniac, et l'utiliser ensuite pour l'alimentation de la chaudière et le démoulage.

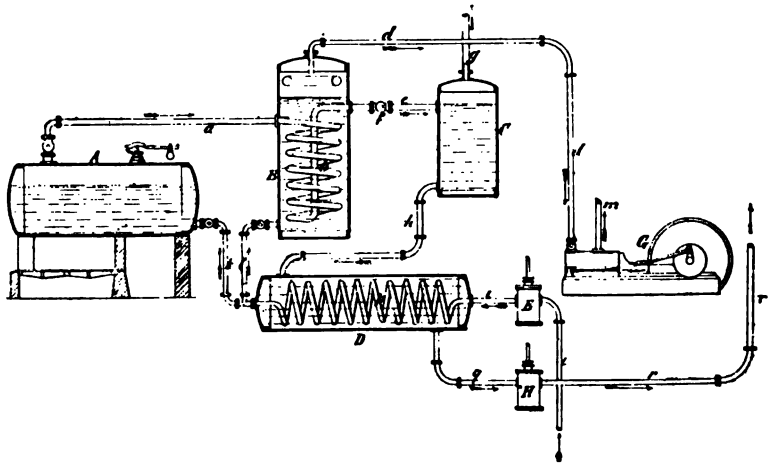


Fig. 140. — *Fabrication de la glace transparente par le procédé Linde.*
La chaudière de distillation à haute pression A envoie sa vapeur se condenser dans le serpentin *b* de la chaudière à basse pression B, dont la vapeur alimente, par *d*, la machine motrice G, d'où elle s'échappe par *m* dans un condenseur. L'eau chaude provenant de la vapeur condensée en *b* passe, par le réducteur de pression *f* et le tuyau *e*, dans le récipient C à la pression atmosphérique, où elle se met à bouillir en expulsant, par *o*, son air avec un peu de vapeur. De C, l'eau distillée et privée d'air, surtout au bas de C, passe, par *h*, au refroidisseur D, puis, par *q*, la pompe H et le tuyau *r*, au service des mouleaux. L'alimentation de la chaudière de distillation A s'opère au moyen de la pompe E, qui aspire son eau par *i* et la refoule dans la chaudière par *i k*, au travers du serpentin *p*, où elle s'échauffe en refroidissant l'eau distillée de D.

On achèvera d'ailleurs de comprendre le fonctionnement de ce procédé par la lecture de l'extrait suivant d'un article publié, dans la *Revue industrielle* du 16 novembre 1889, par M. Triana, ingénieur de la Société des glaces pures.

1. Brevet anglais 3363 de 1887.

« Cette usine, comprend (pl. 9 à 15), en dispositifs spéciaux aux procédés Fixary, un groupe d'appareils imaginés par M. de Stoppani, ingénieur

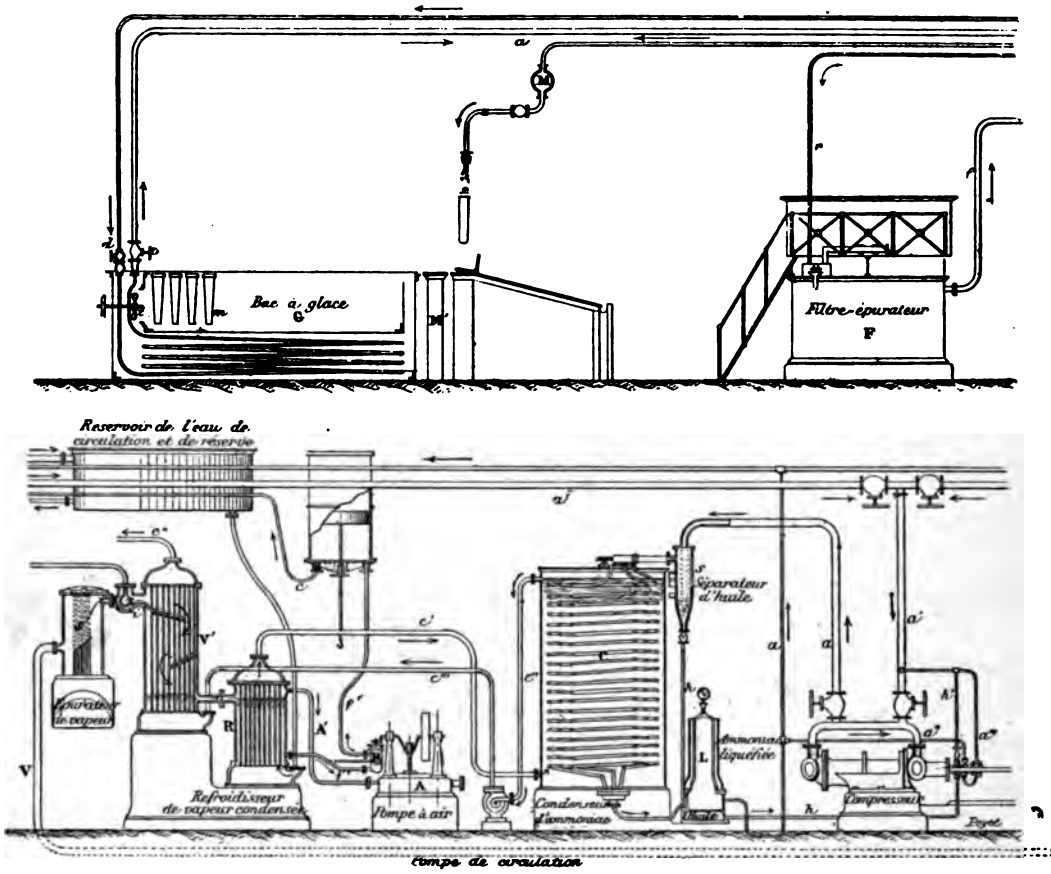


Fig. 141. — *Fabrication de la glace transparente par le procédé Fixary-Stoppani.* — Dessin schématique.

L'ammoniac refoulé du compresseur par le gros tuyau *a* passe, après s'être débarrassé de son huile en *s*, dans le condenseur *c*, d'où il va s'accumuler à l'état liquide dans le récipient à ammoniac ou liquéfacteur L : du bas de ce récipient, l'ammoniac liquide passe par le petit tuyau *a a* au robinet détendeur *d* du bac à glace G, dans les serpentins duquel il se détend en refroidissant une dissolution de chlorure de calcium incongelable où plongent les mouleaux à glace *m*. L'ammoniac détendu revient ensuite, par *oa'a'*, à l'aspiration du compresseur.

Le séparateur d'huile S est constitué par une série de tôles perforées disposées en chicanes, sur lesquelles l'ammoniac dépose, en les traversant successivement, l'huile entraînée dans la circulation : cette huile tombe, par *h*, dans un récipient séparé au bas du liquéfacteur, d'où elle passe, ainsi sous pression, au joint pâteux du compresseur, qui la restitue à la circulation en *a'*, par le tuyau *h*.

L'eau destinée à faire la glace provient en grande partie de la condensation de la vapeur d'échappement de la machine motrice. Cette vapeur, amenée par le tuyau V, se débarrasse de sa graisse dans l'épurateur de vapeur *s'*, cons-

trait sur le même principe que le séparateur d'huile S, et va se condenser dans le condenseur à surfaces V', où elle se débarrasse en même temps en partie de son air, sous l'aspiration A' de la pompe à air A. L'eau condensée et privée de la moyenne partie de son air, mais chaude, va se refroidir et abandonne le reste de son air dans un second condenseur à surfaces R, également en rapport avec la pompe à air. L'eau distillée, refroidie et privée d'air est prise au bas du refroidisseur R par une pompe B qui la refoule, par *r'*, sous un accumulateur *e*, qui la renvoie au réservoir de chargement des moulaux M. Pour charger les moulaux, on les amène, en *x*, sous une série de crépines de chargement à soupape s'ouvrant seulement lorsqu'elles viennent toucher le fond des moulaux, de manière que le remplissage se fasse sous l'eau, à l'abri de l'air. Le supplément d'eau nécessaire pour suffire au service de la glace, est fourni par le tuyau *r* du réservoir de circulation à un filtre F d'où elle passe par *f* à l'injection *i*, au haut du condenseur V', où elle se mêle à l'arrivée de vapeur qu'elle condense en partie.

L'eau de circulation passe, en charge, de la cuve de réserve au refroidisseur R, puis, par *c*, au bas du condenseur d'ammoniac C, d'où elle est refoulée, par la pompe de circulation *p* et le tuyau *c'''*, dans les tubes du condenseur de vapeur V', dont elle s'échappe par *c''*.

de la société des constructions mécaniques spéciales, en vue de mettre à profit pour la fabrication de la glace la vapeur d'échappement des moteurs, après l'avoir préalablement dépouillée de l'huile provenant du graissage.

« Les appareils de cette seconde partie de l'installation sont destinés à la production d'une glace transparente. Après avoir condensé la vapeur d'échappement des moteurs, ils filtrent l'eau condensée et la privent d'air, de façon à ne donner à la consommation qu'une glace absolument pure et dénuée de tous principes ou germes morbides.

« A ce propos, il n'est pas inutile d'ouvrir une parenthèse et de rappeler que les glaces naturelles, provenant, pour la plupart, d'eaux stagnantes, contiennent des germes morbides en abondance. La fabrication de la glace pure est donc d'une grande importance en ce qui concerne la santé des consommateurs. De nombreuses expériences faites en Autriche, en Allemagne et aux Etats-Unis ont montré surabondamment que les microbes en général, et notamment les bacilles de la fièvre typhoïde, qu'on rencontre le plus souvent dans les eaux souillées par les détritus des villes, résistent aux plus grands froids et peuvent parfaitement vivre dans l'eau congelée (1).

1. Dans un article paru dans la *Revue scientifique*, du 3 septembre 1887, intitulé : « Les bactéries de la glace », M. de Varigny a cité les faits suivants : « Les conclusions auxquelles M. Prudden (1) arrive n'ont pas seulement un intérêt local ; elles sont susceptibles d'être généralisées de la façon la plus légitime. Ce qui est vrai de l'Hudson, l'est de la Seine, de la Tamise et de tous les fleuves qui, aujourd'hui, sont plus ou moins infectés par les impuretés que leur confient les villes et les villages, et les mêmes résultats s'appliquent, à de légères différences près, à tous les lieux d'origine de l'eau et de la glace absorbées. Ces résultats montrent que la bacille de la fièvre typhoïde, par exemple, pour ne citer qu'un seul des nombreux microbes pa-

1. L'excellent travail de M. Prudden est publié dans le « New-York medical Record ». (26 mars et 9 octobre 1887.)

« Nous ne croyons pas inutile de nous être attardé à faire ressortir les qualités hygiéniques de la glace pure. L'usine dont nous allons parler n'est pas la seule application en grand du procédé Fixary ; elle résume les perfectionnements réalisés dans son emploi, tant en France qu'à l'étranger, et notamment à Bruxelles (Société anglo-belge et Société frigorifique, de Bruxelles), à Cologne (Cristal Eisfabrik), à Lisbonne (Société frigorifique portugaise).

« A Paris même, la Société française de glace pure avait commencé l'application de ce procédé sur une petite échelle ; mais l'usine qui réalisait cette première application est bientôt devenue insuffisante au point de vue de la production, bien qu'elle produisit 24.000 kilogrammes de glace en 24 heures. Elle avait permis toutefois d'apprécier la parfaite qualité de la glace fabriquée par les machines Fixary. On en vint à décider la création d'une usine importante dans laquelle tous les perfectionnements pratiques, indiquée par une expérience de plus d'une année, ont été appliqués. Toutes les parties de cette installation réellement importante ont été étudiées avec soin sous notre direction ; elles portent la production totale de l'usine à 80.000 kilogrammes de glace en 24 heures.

La planche 11-12 donne deux vues d'ensemble de la nouvelle usine, et les dessins de la planche 13-14 en représentent divers appareils spéciaux, entre autres, ceux qui se rattachent spécialement à la fabrication de la glace transparente.

« De même que tous les moyens connus par la production du froid, la fabrication de la glace par les procédés Fixary est basée sur le changement d'état d'un corps. Dans le cas actuel, le froid est obtenu par la détente du gaz ammoniac préalablement liquéfié, puis ramené à l'état liquide par compression, et cela indéfiniment, sans qu'on puisse apprécier une déperdition de gaz ammoniac.

« En outre des moteurs et des générateurs à vapeur du système Farcot, la nouvelle usine se compose essentiellement : 1° de deux compresseurs à ammoniaque B, correspondant chacun à la production de 1000 à 1200 kilogrammes de glace à l'heure ; 2° de deux paires de condenseurs C, ou liquéfacteurs d'ammoniac, pourvus de serpentins en fer d'une seule pièce ; 3° de deux bacs réfrigérants F ou congélateurs, pour effectuer l'évaporation de l'ammoniaque au

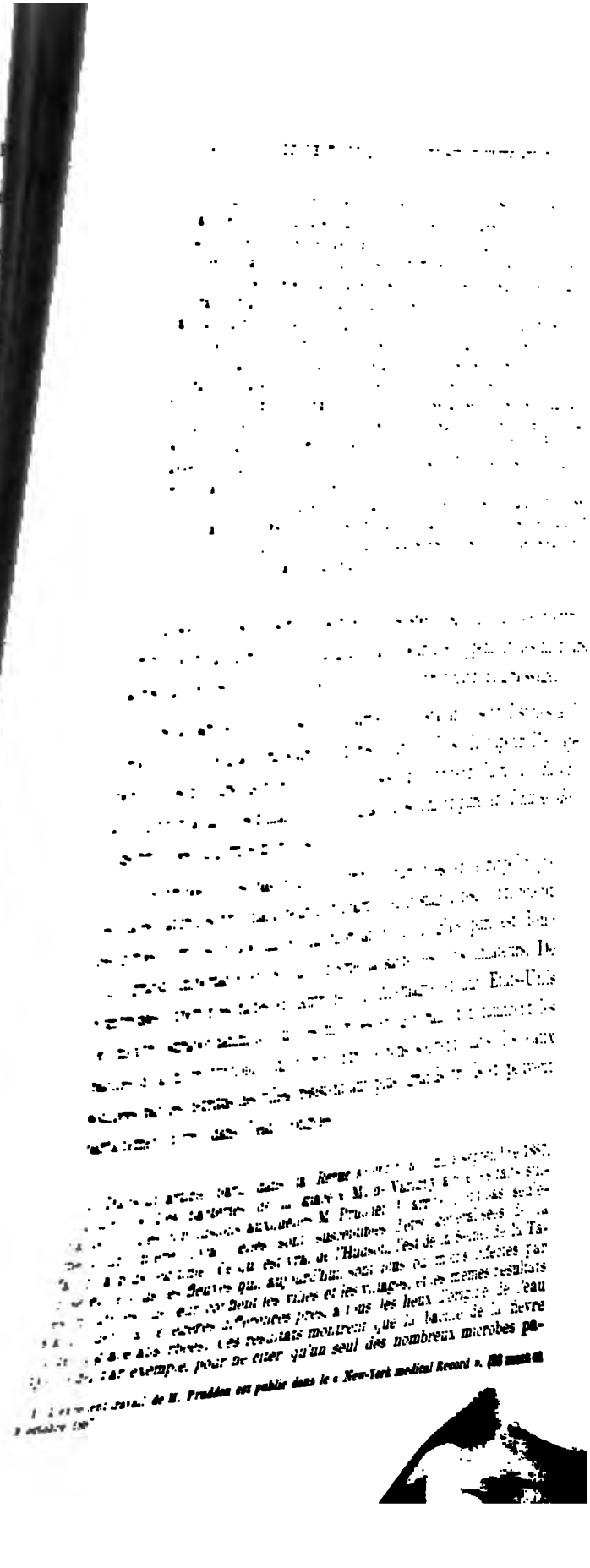
thogènes susceptibles de prosperer dans l'eau, résiste à une congélation prolongée, et que la glace des eaux contaminées ne vaut pas mieux pour la santé publique que ces eaux elles-mêmes, et il est présumable qu'un certain nombre d'autres microbes pathogènes résistent avec le même succès. La glace présente donc les mêmes dangers que l'eau dont elle dérive, et pour être sans inconvénient, il faut que l'eau dont elle dérive soit parfaitement pure et inoffensive. C'est dire que la glace récoltée dans le voisinage des villes sera toujours suspecte et que seule la glace des glaciers montagneux, isolés, élevés, ou celle que l'on produit artificiellement, en employant de l'eau distillée ou de l'eau de source reconnue pure, sera exempte d'inconvénients, en ce qui concerne la propagation des maladies infectieuses. »

Purge d'air. — Pendant l'opér
mise en marche régulière, on voit
quer une pression de 12 atmosphèr
certaine quantité d'air n'a pu être
pendant le chargement. La prése
produit des élévations de températ
blement la pression dans le conde
dès la mise en marche régulière. E
laisse la machine en repos penda
qui s'est accumulé dans le conde
séparer et de s'accumuler au-des
desserrera un peu le bouchon de
le robinet d'isolement G, sans le
siffler par le bouchon P. Dès q
les fumées blanches du gaz accu
immédiatement le robinet G, p
les rentrées d'air étant impos
d'un nouveau chargement d'h

Mise en marche régulière.
d'eau bien établies, on peut c

On ouvre tous les robinets
deux petits robinets Q et R,
On ouvre alors très légèrem
précipitera immédiatement d
par sa vaporisation et sa d
contenue dans les mouleau
que instantanément le giv
l'ouverture de ce robinet d
pression d'environ 1 atm.
robinet de réglage, jusqu
Lorsque le manomètre d'
de 1 atm., 5, le robinet d

Congélation de l'hu
pertes de gaz produites p
comme le plus grave dé
arrivé à les supprimer
cipe consiste à congel
au-dessus du presse-
Sous l'action du fr
serrée et compacte



ous ne croyons pas inutile de nous être attardé à faire ressortir les qua- hygiéniques de la glace pure. L'usine dont nous allons parler n'est seule application en grand du procédé Fixary ; elle résume les perfec- ements réalisés dans son emploi, tant en France qu'à l'étranger, et no- ment à Bruxelles (Société anglo-belge et Société frigorifique, de Bruxelles), logne (Cristal Eisfabrik), à Lisbonne (Société frigorifique portugaise).

A Paris même, la Société française de glace pure avait commencé l'applica- n de ce procédé sur une petite échelle ; mais l'usine qui réalisait cette pre- ère application est bientôt devenue insuffisante au point de vue de la pro- ction, bien qu'elle produisit 24.000 kilogrammes de glace en 24 heures. lle avait permis toutefois d'apprécier la parfaite qualité de la glace fabriquée ar les machines Fixary. On en vint à décider la création d'une usine impor- ante dans laquelle tous les perfectionnements pratiques, indiquée par une xpérience de plus d'une année, ont été appliqués. Toutes les parties de cette installation réellement importante ont été étudiées avec soin sous notre direction ; elles portent la production totale de l'usine à 80.000 kilogrammes de glace en 24 heures.

La planche 11-12 donne deux vues d'ensemble de la nouvelle usine, et les dessins de la planche 13-14 en représentent divers appareils spéciaux, entre autres, ceux qui se rattachent spécialement à la fabrication de la glace transparente.

« De même que tous les moyens connus par la production du froid, la fabrication de la glace par les procédés Fixary est basée sur le changement d'état d'un corps. Dans le cas actuel, le froid est obtenu par la détente du gaz ammoniac préalablement liquéfié, puis ramené à l'état liquide par compression, et cela indéfiniment, sans qu'on puisse apprécier une déperdition de gaz ammoniac.

« En outre des moteurs et des générateurs à vapeur du système Fixary, la nouvelle usine se compose essentiellement : 1° de deux [illegible] à ammoniaque B, correspondant chacun à la production de 1000 [illegible] de glace à l'heure ; 2° de deux paires de condenseurs C, [illegible] ammoniac, pourvus de serpentins en fer d'une seule pièce [illegible] gérants F ou congélateurs, pour effectuer l'évaporation [illegible]

thogènes susceptibles de prospérer dans l'eau [illegible] longée, et que la glace des eaux contaminées [illegible] publique que ces eaux elles-mêmes, et [illegible] d'autres microbes pathogènes résident [illegible] sente donc les mêmes dangers que l'eau [illegible] inconvénient, il faut que l'eau [illegible] fensive. C'est dire que la glace [illegible] jours suspecte et que seule la glace [illegible] ou celle que l'on produit [illegible] l'eau de source reconnue pure [illegible] ne la propagation [illegible]

moyen de serpentins en fer d'une grande longueur, de telle sorte que la très basse température à laquelle ils sont toujours maintenus se communique rapidement au bain incongelable de chlorure de calcium qui les entoure. Il suffit de plonger dans ce bain, pendant un certain temps, des moules remplis d'eau pour obtenir des blocs de glace de dimensions voulues. Parmi les appareils accessoires, on distingue les égoutteurs séparateurs d'huile D et les récipients à ammoniac.

« En second lieu, les appareils à glace pure et transparente comprennent un épurateur de vapeur L, un condenseur de vapeur M, un refroidisseur N, un filtre O, deux pompes à air P, deux pompes alimentaires Q et deux accumulateurs R.

« Les pompes de compression aspirent dans les bacs congélateurs et par les tuyaux *c d*, l'ammoniac dont la détente a déjà produit son effet. Comme cet ammoniac conserve encore à peu de chose près la basse température à laquelle il se trouvait dans les serpentins du bac, nous avons demandé que le tuyau d'aspiration traversât, avant de se rendre à la pompe de compression, l'eau approvisionnée dans le réservoir I pour le remplissage des mouleaux. De cette manière, on utilise une partie du froid de l'ammoniac pour opérer en I un premier refroidissement de l'eau à congeler.

« Après avoir aspiré l'ammoniac détendu, les compresseurs le refoulent par les conduites *e* dans les condenseurs à serpentins C, dits liquéfacteurs, en le faisant passer au préalable dans l'égoutteur à chicanes ou séparateur d'huile D, où il se débarrasse de l'huile entraînée (fig. 3). En raison de sa densité, celle-ci tombe au fond de l'égoutteur, tandis que le gaz ammoniac purifié en sort à la partie supérieure pour pénétrer dans les serpentins des condenseurs. Là, sous l'action combinée de la compression et d'un courant continu d'eau froide, il se liquéfie et se rend, par la conduite *g*, dans le plus haut des deux compartiments du récipient E.

« Du fond de l'égoutteur, l'huile est conduite par un tuyau vertical dans l'autre compartiment de ce récipient, où, grâce à la pression du refoulement, elle peut être renvoyée sous les pistons du compresseur pour assurer le graissage des tiges et l'étanchéité du joint hydraulique des garnitures.

« Le compartiment supérieur du récipient constitue une réserve d'ammoniac liquéfié, qui assure la régularité de la détente. C'est de là que part la conduite *a*, aboutissant au robinet de détente *b*, dont l'ouverture est réglée pour admettre dans le congélateur la quantité d'ammoniac voulue.

« Sous l'aspiration produite par la pompe de compression dans les conduites *c* et *d*, l'ammoniaque se détend et passe à l'état gazeux en produisant un froid intense qui se communique au bain incongelable de chlorure de calcium entourant les serpentins du réfrigérant. Ce bain est agité d'une façon continue

au moyen d'une paire d'hélices commandées par l'arbre de transmission X, et il refroidit à son tour les mouleaux pleins d'eau qui y sont plongés.

« Dans le congélateur, la pression du gaz détendu n'est à ce moment que de deux atmosphères absolues ; ce fluide revient ensuite, par la conduite *c* au bac I, puis, par le tuyau D, dans la pompe de compression où il est de nouveau comprimé et refoulé dans les condenseurs.

« *Circulation d'eau froide dans les condenseurs.* — L'eau froide, circulant autour des serpentius de chaque condenseur pour produire la liquéfaction de l'ammoniaque est prise dans un puits situé entre les deux compresseurs. Deux excentriques calés sur l'arbre de couche de ces derniers actionnent à cet effet deux pompes Y, pouvant débiter 80 m^3 à l'heure. L'eau refoulée est conduite par le tuyau Z dans des réservoirs d'alimentation, placés en dehors de l'usine, plus hauts que les condenseurs. Elle en sort par un tuyau *r* (fig. 4 et 5), qui la conduit au refroidisseur N, d'où elle se rend à la partie supérieure des condenseurs à ammoniac par le tuyau *r'*. Dans le faisceau tubulaire du refroidisseur, chemine, en sens inverse de cette eau de puits, l'eau venant du condenseur de vapeur M ; on abaisse ainsi la température de cette dernière, sans pour cela échauffer, d'une manière sensible (1 degré au plus) l'eau destinée à la condensation de l'ammoniac.

« Dans les condenseurs à ammoniaque, l'échange des températures entre l'eau de puits et les serpentins est facilitée par des agitateurs à palettes, actionnés au moyen d'un arbre de transmission spécial et de renvois convenables. Une fois échauffée, l'eau s'échappe par des trop-pleins placés en haut des condenseurs et se rend, par la conduite *s* à une pompe centrifuge S, qui l'envoie au condenseur à surface M, et, de là, à l'extérieur par le tuyau U. Avant d'être abandonnée, l'eau de puits a donc été utilisée trois fois pour le refroidissement par circulation.

« C'est ici qu'interviennent les appareils de M. de Stoppani pour la fabrication de la glace pure et transparente.

« On a vu plus haut que, dans son troisième et dernier emploi, l'eau de circulation condense la vapeur d'échappement du moteur amenée par le tuyau *h* à l'épurateur L qui la dépouille des traces d'huile entraînée. A la sortie de ce dernier, cette vapeur rencontre en *n'* un jet d'eau froide et pure venant d'un épurateur d'eau de source dont nous expliquons plus loin le fonctionnement. Il résulte de ce mélange que l'eau épurée est portée à la température d'ébullition par la vapeur qui lui abandonne une partie de sa chaleur. La condensation se termine dans le condenseur à surface M, et le mélange passe finalement dans le refroidisseur N, où s'achève le refroidissement. En même temps, les pompes à air P déterminent dans cet appareil, par les tuyaux *p*, un vide d'environ 0,700 *m* de mercure afin de priver l'eau de l'air qu'elle contient.

Le même degré de vide se maintient naturellement dans le condenseur à surface : c'est ainsi que les machines à vapeur employées sont transformées en moteurs à condensation.

« Deux petites pompes alimentaires Q, accouplées aux pompes à air, aspirent la vapeur condensée par le tuyau K, et la refoulent en *l* à travers le filtre O. La pression exercée ainsi sur l'eau à filtrer l'oblige non-seulement à traverser le filtre, mais aussi à se rendre dans l'accumulateur R par la conduite *m*.

« Le filtre est pourvu à sa partie supérieure d'une soupape de sûreté, pour empêcher les chocs qui pourraient se produire, si, pour une cause ou une autre, la circulation de l'eau n'était pas assez rapide.

« Nous avons parlé plus haut d'un épurateur alimentant la conduite *n'* du condenseur M. Il convient de faire remarquer, à ce sujet, que l'eau fournie par la condensation de la vapeur des moteurs, est insuffisante pour l'alimentation des mouleaux à congeler ; il faut ajouter un complément d'eau de source (dans le cas actuel, elle vient de la Dhuys) préalablement purifiée.

« L'épurateur de cette usine est du système Howatson ; son fonctionnement est basé sur l'emploi d'un réactif préparé dans une capacité déterminée et composé d'un mélange d'eau, de chaux éteinte et de soude caustique, en proportions variables suivant la nature de l'eau à épurer. Ce réactif est envoyé par un orifice réglable dans un récipient où arrive également l'eau à épurer. Le mélange, dont les éléments sont en proportions convenables, rencontre alors une série de plans inclinés destinés à favoriser la décantation des précipités calcaires qui se sont formés, et un filtre formé d'éponges retient les parties solides en suspension dans l'eau.

« A la sortie du filtre, l'eau épurée est recueillie dans un réservoir d'où elle se rend, comme on l'a vu plus haut, par le tuyau *n'*, au condenseur de vapeur. Un flotteur assure la fermeture automatique du réservoir lorsqu'il est vide et empêche ainsi les rentrées d'air dans le condenseur de vapeur.

« Les cylindres communiquants de l'accumulateur R contiennent chacun un piston, dont la tige est reliée par une chaîne à un robinet qui ferme automatiquement les pompes alimentaires en cas de trop plein. A chaque ouverture de l'un des robinets *o*; le poids de ce piston et la position élevée de l'accumulateur déterminent l'envoi d'eau sous pression, dans le récipient I (fig. 2), par le tuyau *n*. Cette eau, toute préparée pour la fabrication de la glace pure et transparente, se rend ensuite par les appareils *o* dans les mouleaux.

« Grâce au faisceau tubulaire traversé par le retour d'ammoniaque, l'eau contenue dans le récipient I subit un premier abaissement de température, qui favorise beaucoup la transparence de la glace. L'expérience a prouvé, en effet, qu'un trop grand écart entre la température de l'eau, au moment où elle est plongée dans le bain incongelable et le bain lui-même, amène, par suite de la trop grande rapidité du refroidissement, une sorte de cristallisation, qui trouble

l'équilibre des molécules. Il en résulte des cassures infinitésimales, qui donnent à la glace un aspect opaque, peu agréable à l'œil.

« Au contraire, si la congélation se fait, comme dans le cas actuel, sans transition brusque de température, on obtient un produit dont la transparence ne le cède en rien à la glace naturelle.

« Dans certains cas, on a recherché simplement cette transparence par une lente congélation de l'eau non épurée et non distillée, en maintenant la température des bacs de congélation à 1 ou 2° au-dessous de zéro ; non seulement la transparence obtenue par ce moyen était défectueuse, mais encore cette congélation lente nécessite des bacs d'une capacité impraticable et d'un prix trop élevé ; de plus, l'eau ordinaire n'avait aucune des garanties de pureté offertes par celle qui a subi les opérations précédemment décrites.

« Dans l'usine de la Société française de glace pure, on a pris les dispositions les plus judicieuses pour la manœuvre rapide et sûre des mouleaux. Le mécanisme au moyen duquel on procède facilement au démoulage des châssis, une fois la congélation obtenue, consiste en un treuil roulant actionné par un jeu de poulies et de transmissions à corde. On voit dans les figures 1 et 2 l'ensemble de l'appareil de levage qui est, d'autre part, représenté en détail dans les figures 8 et 10.

« La commande motrice vient de la transmission V, placée au-dessus du bac refroidisseur I ; cette installation est double, et le mouvement est communiqué à chacun des treuils roulants G par l'intermédiaire d'un câble sans fin allant passer, à l'arrière du bassin de congélation, autour d'une seconde transmission de commande X ; celle-ci reçoit son mouvement de la précédente à l'aide d'un câble, et sert aussi à actionner les agitateurs à hélice. Ses deux poulies réceptrices ont un support spécial, qui peut se déplacer sous l'action d'un contrepoids ou tendeur, afin de compenser l'allongement du câble.

« Dans chaque treuil roulant, la poulie de commande peut être rendue à volonté, fixe ou folle sur son arbre V au moyen d'un embrayage à volant, et le câble passe en boucle sur deux poulies, qui actionnent les mécanismes de propulsion et de déplacement de la charge. Ces mécanismes, sensiblement analogues, consistent en une paire d'engrenages coniques tournant continuellement en sens inverse sous l'action d'un pignon commun.

« L'ouvrier fait, à l'aide du levier *a* d'un embrayage à friction, circuler le chariot roulant sur les files de rails placés au-dessus du bac. Un autre levier *b* commande au moyen d'un embrayage denté deux chaînes qui permettent de suspendre, d'élever ou d'abaisser un châssis de vingt mouleaux de glace, pesant chacun 25 kilogrammes.

« Le démoulage se fait en vingt minutes de la manière suivante : on élève au-dessus du bac le premier châssis de l'avant, dont les mouleaux sont à l'état de congélation complète, on avance ce châssis au-dessus de la cuve à eau chaude H,

Nous ne pouvons guère qu'indiquer ces diverses applications du froid, et ne donner quelques détails que sur les trois applications suivantes :

La *fabrication de la glace;*

La *fabrication de l'air froid;*

La *conservation des viandes* et denrées alimentaires.

Ces trois applications, les plus importantes, comprennent d'ailleurs, comme dérivées, presque toutes celles que nous venons de signaler.

Fabrication de la glace

L'application la plus importante des machines frigorifiques est la fabrication de la glace.

La glace se fabrique en congelant l'eau renfermée dans des bacs cloisonnés fixes, à l'intérieur des parois desquels circule un liquide incongelable, ou dans des mouleaux mobiles, plongés dans un liquide traversé par des serpentins que parcourt le gaz réfrigérant. Les mouleaux mobiles, plus économiques et d'un maniement plus commode, sont de beaucoup les plus employés. On les fait indifféremment, en tôle étamée ou galvanisée.

On distingue dans le commerce deux sortes de glace : la *glace transparente* et la *glace opaque*. Cette dernière, préférable pour l'alimentation puisqu'elle doit son opacité à la présence d'un excès d'air, n'est pourtant admise que dans les usages industriels, où son air est parfois nuisible, et pour lesquels elle présente, en raison de sa plus grande légèreté, l'inconvénient de fondre plus vite et de moins refroidir, à volume égal, que la glace transparente. Ajoutons qu'il importe, pour la consommation et pour les usag es médicaux, de n'employer comme eaux servant à la fabrication de la glace que des eaux filtrées et débarrassées, autant que possible, par la chaleur ou autrement, de leurs impuretés organiques (microbes, etc.), qui ne sont pas rendus inoffensifs par la congélation [1].

Les principaux procédés employés pour produire de la glace transparente sont au nombre de cinq :

La congélation lente ;

La congélation dans le vide ;

L'agitation de l'eau pendant la congélation ;

L'ébullition ou la distillation de l'eau privée d'air ;

La congélation de l'eau provenant de la condensation de la vapeur d'échappement.

1. *Revue scientifique*, 3 septembre 1887, les « bactéries de la glace» par M. de Varigny.

La congélation lente, dans un bain à 3° environ, imite le procédé de la nature et donne des résultats excellents. D'une simplicité parfaite, elle présente l'inconvénient d'exiger des bacs énormes, coûteux et multipliant les chances de fuites.

Le vide, combiné parfois avec l'ébullition (1) ou l'agitation (2), donne aussi une glace très belle; mais il exige des appareils coûteux, compliqués et d'un maniement difficile; aussi est-il presque abandonné.

L'agitation exige aussi des mécanismes souvent encombrants, coûteux et compliqués, On peut le produire, soit dans les mouleaux [à l'intérieur (3) ou à la surface (4) de l'eau à congeler, par des vannes (5), des ailettes (6) ou des pompes de circulation (7)], soit dans des compartiments fixes, autour de leurs cloisons, par des moyens analogues, principalement par des pompes de circulation (8), soit, enfin, par l'agitation même des mouleaux au sein du liquide incongelable (9). Les inconvénients de ces solutions mécaniques, qui ne procurent pas toujours une glace très belle, sont tels qu'elles ne sont guère répandues, malgré leur grand nombre et le caractère ingénieux de quelques-unes d'entre elles.

Il n'en est pas de même de la *distillation* et de *l'ébullition* de l'eau à congeler, coûteuses si on les opère isolément, mais économiques en combustible si on les obtient par une chaudière auxiliaire à surpression, ou en utilisant la vapeur d'échappement du moteur.

La première solution est celle de *Linde* (10) ; il chauffe la chaudière du moteur, à grandes surfaces évidemment, par la condensation de la vapeur d'une chaudière de distillation portée à une pression plus élevée ; cette eau, condensée sous pression, passe, par un réducteur, dans un récipient ouvert à la pression atmosphérique, où elle entre en ébullition en perdant son air, puis elle est refoulée aux mouleaux au travers d'un réchauffeur d'alimentation dans lequel elle se refroidit en cédant sa chaleur à l'eau d'alimentation des deux chaudières. Cette solution, très rationnelle, exige l'installation d'appareils encombrants et coûteux, mais elle donne de l'eau distillée pure, sans graisse, et privée d'air.

1. Edwards, Brevet anglais 3123 de 1881. — Raydt, Brevet anglais 3347 de 1885.
2. Gamgee, Brevet anglais 4064 de 1877.
3. Young, Brevets anglais 826 de 1879, 887 de 1880, 1460 de 1882. — Linde Brevet anglais 9612 de 1885.
4. Nightingale, Brevet anglais 13923 de 1884.
5. Osenbruck, Brevet anglais 954 de 1882. Schwarz (*Eismaschinen*, p. 404).
6. Mutter, Brevet anglais 736 de 1883.
7. Gorman, Brevet anglais 2353 de 1879. — Puplett, Brevet anglais 12542 de de 1884.
8. Skene, Mackay, Gorman et Willcox, Brevets anglais 1515 et 2343 de 1879, 3038 de 1880, 553 de 1881.
9. Dowrie, Ingram, Rankin, Brevets anglais 4817 de 1881, 14989 et 15437 de 1885.
10. Brevet anglais 16270 de 1886. — Voir aussi le brevet français n° 118846 de MM. Mignon et Rouart, en date du 1er mai 1879.

Lorsqu'on emploie pour faire la glace la vapeur d'échappement de la machine motrice, qui suffit généralement à 15 ou 20 % près, il faut au contraire employer pour la débarrasser de sa graisse, des dispositions spéciales. Dans l'appareil de M. *de Stoppani* (1) (fig. 141), la vapeur d'échappement, déjà condensée en partie par une injection complémentaire d'eau épurée, traverse, avant d'aller se condenser définitivement autour des tubes d'un condenseur à surfaces, un séparateur constitué par une série de tôles perforées disposées en chicanes de manière à contrarier son cours, et le long desquelles la vapeur abandonne l'huile entraînée. L'air est enlevé par une pompe à air, qui maintient constamment le vide au-dessus du niveau de la vapeur précipitée dans le condenseur à surface : cette eau privée d'air est ensuite pompée dans un réservoir ou accumulateur aboutissant au remplissage des mouleaux. On peut employer pour le condenseur à surfaces la même eau que pour le refroidissement du condenseur d'ammoniac, et l'utiliser ensuite pour l'alimentation de la chaudière et le démoulage.

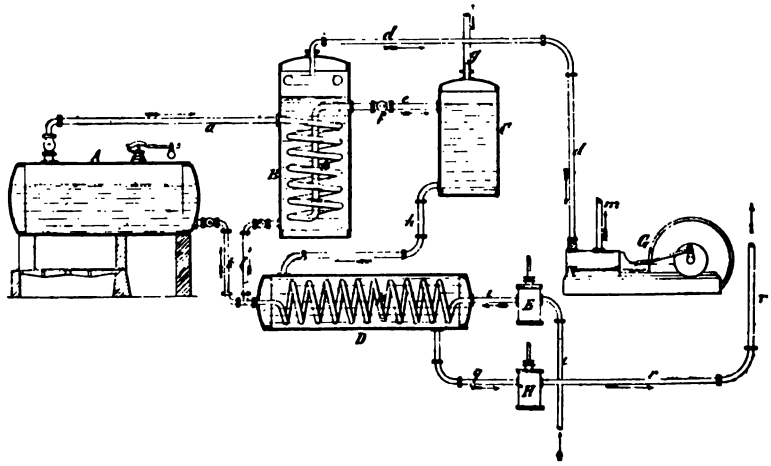


Fig. 140. — *Fabrication de la glace transparente par le procédé Linde.*

La chaudière de distillation à haute pression A envoie sa vapeur se condenser dans le serpentin *b* de la chaudière à basse pression B, dont la vapeur alimente, par *d*, la machine motrice G, d'où elle s'échappe par *m* dans un condenseur. L'eau chaude provenant de la vapeur condensée en *b* passe, par le réducteur de pression *f* et le tuyau *e*, dans le récipient C à la pression atmosphérique, où elle se met à bouillir en expulsant, par *o*, son air avec un peu de vapeur. De C, l'eau distillée et privée d'air, surtout au bas de C, passe, par *h*, au refroidisseur D, puis, par *q*, la pompe H et le tuyau *r*, au service des mouleaux. L'alimentation de la chaudière de distillation A s'opère au moyen de la pompe E, qui aspire son eau par *i* et la refoule dans la chaudière par *i k*, au travers du serpentin *p*, où elle s'échauffe en refroidissant l'eau distillée de D.

On achèvera d'ailleurs de comprendre le fonctionnement de ce procédé par la lecture de l'extrait suivant d'un article publié, dans la *Revue industrielle* du 16 novembre 1889, par M. Triana, ingénieur de la Société des glaces pures.

1. Brevet anglais 3363 de 1887.

« Cette usine, comprend (pl. 9 à 15), en dispositifs spéciaux aux procédés Fixary, un groupe d'appareils imaginés par M. de Stoppani, ingénieur

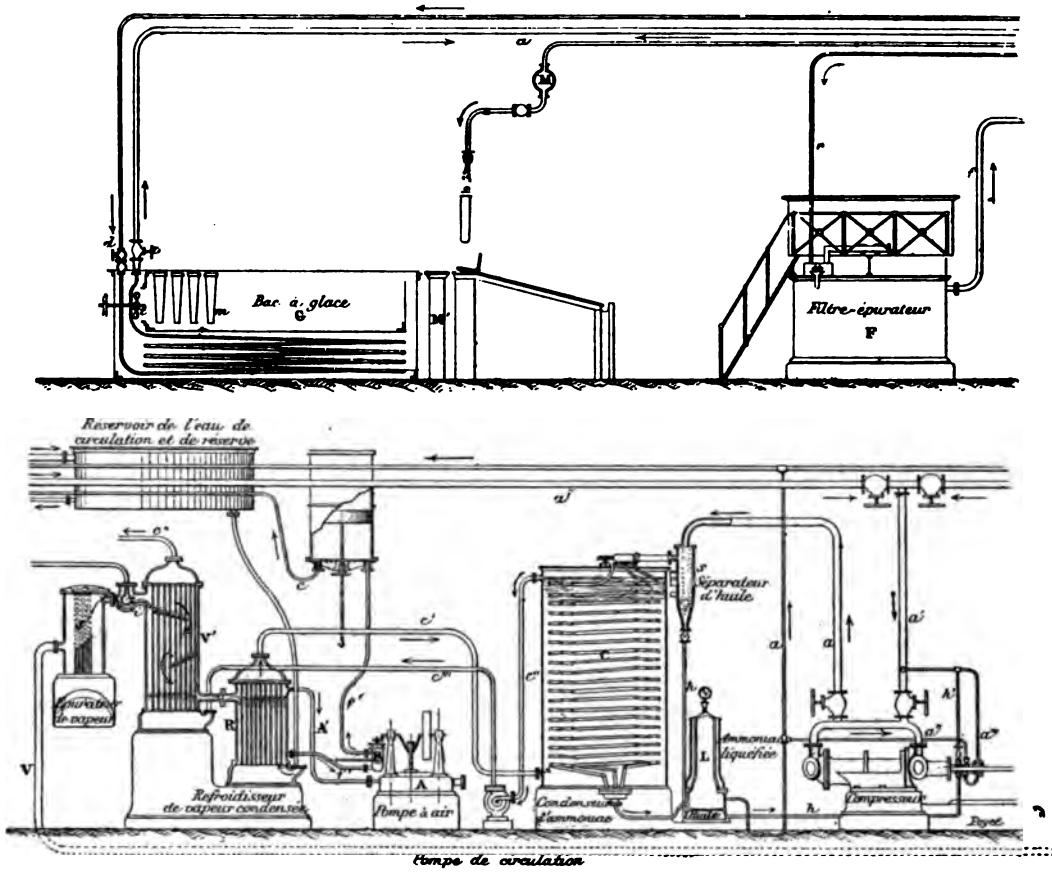


Fig. 141. — *Fabrication de la glace transparente par le procédé Fixary-Stoppani.* — Dessin schématique.

L'ammoniac refoulé du compresseur par le gros tuyau *a* passe, après s'être débarrassé de son huile en *s*, dans le condenseur *c*, d'où il va s'accumuler à l'état liquide dans le récipient à ammoniac ou liquéfacteur L : du bas de ce récipient, l'ammoniac liquide passe par le petit tuyau *a a* au robinet détendeur *d* du bac à glace G, dans les serpentins duquel il se détend en refroidissant une dissolution de chlorure de calcium incongelable où plongent les mouleaux à glace *m*. L'ammoniac détendu revient ensuite, par *oa'a'*, à l'aspiration du compresseur.

Le séparateur d'huile S est constitué par une série de tôles perforées disposées en chicanes, sur lesquelles l'ammoniac dépose, en les traversant successivement, l'huile entraînée dans la circulation : cette huile tombe, par *h*, dans un récipient séparé au bas du liquéfacteur, d'où elle passe, ainsi sous pression, au joint pâteux du compresseur, qui la restitue à la circulation en *a'*, par le tuyau *h*.

L'eau destinée à faire la glace provient en grande partie de la condensation de la vapeur d'échappement de la machine motrice. Cette vapeur, amenée par le tuyau V, se débarrasse de sa graisse dans l'épurateur de vapeur *s'*, cons-

truit sur le même principe que le séparateur d'huile S, et va se condenser dans le condenseur à surfaces V', où elle se débarrasse en même temps en partie de son air, sous l'aspiration A' de la pompe à air A. L'eau condensée et privée de la moyenne partie de son air, mais chaude, va se refroidir et abandonne le reste de son air dans un second condenseur à surfaces R, également en rapport avec la pompe à air. L'eau distillée, refroidie et privée d'air est prise au bas du refroidisseur R par une pompe B qui la refoule, par *r'*, sous un accumulateur *c*, qui la renvoie au réservoir de chargement des mouleaux M. Pour charger les mouleaux, on les amène, en *x*, sous une série de crépines de chargement à soupape s'ouvrant seulement lorsqu'elles viennent toucher le fond des mouleaux, de manière que le remplissage se fait sous l'eau, à l'abri de l'air. Le supplément d'eau nécessaire pour suffire au service de la glace, est fourni par le tuyau *r* du réservoir de circulation à un filtre F d'où elle passe, par *f* à l'injection *i*, au haut du condenseur V', où elle se mêle à l'arrivée de vapeur qu'elle condense en partie.

L'eau de circulation passe, en charge, de la cuve de réserve au refroidisseur R, puis, par *c*, au bas du condenseur d'ammoniac C, d'où elle est refoulée, par la pompe de circulation *p* et le tuyau *c'''*, dans les tubes du condenseur de vapeur V', dont elle s'échappe par *c''*.

de la société des constructions mécaniques spéciales, en vue de mettre à profit pour la fabrication de la glace la vapeur d'échappement des moteurs, après l'avoir préalablement dépouillée de l'huile provenant du graissage.

« Les appareils de cette seconde partie de l'installation sont destinés à la production d'une glace transparente. Après avoir condensé la vapeur d'échappement des moteurs, ils filtrent l'eau condensée et la privent d'air, de façon à ne donner à la consommation qu'une glace absolument pure et dénuée de tous principes ou germes morbides.

« A ce propos, il n'est pas inutile d'ouvrir une parenthèse et de rappeler que les glaces naturelles, provenant, pour la plupart, d'eaux stagnantes, contiennent des gerbes morbides en abondance. La fabrication de la glace pure est donc d'une grande importance en ce qui concerne la santé des consommateurs. De nombreuses expériences faites en Autriche, en Allemagne et aux Etats-Unis ont montré surabondamment que les microbes en général, et notamment les bacilles de la fièvre typhoïde, qu'on rencontre le plus souvent dans les eaux souillées par les détritus des villes, résistent aux plus grands froids et peuvent parfaitement vivre dans l'eau congelée (1).

1. Dans un article paru dans la *Revue scientifique*, du 3 septembre 1887, intitulé : « Les bactéries de la glace », M. de Varigny a cité les faits suivants : « Les conclusions auxquelles M. Prudden [1] arrive n'ont pas seulement un intérêt local ; elles sont susceptibles d'être généralisées de la façon la plus légitime. Ce qui est vrai de l'Hudson, l'est de la Seine, de la Tamise et de tous les fleuves qui, aujourd'hui, sont plus ou moins infectés par les impuretés que leur confient les villes et les villages, et les mêmes résultats s'appliquent, à de légères différences près, à tous les lieux d'origine de l'eau et de la glace absorbées. Ces résultats montrent que la bacille de la fièvre typhoïde, par exemple, pour ne citer qu'un seul des nombreux microbes pa-

1. L'excellent travail de M. Prudden est publié dans le « New-York medical Record ». (26 mars et 9 octobre 1887.)

« Nous ne croyons pas inutile de nous être attardé à faire ressortir les qualités hygiéniques de la glace pure. L'usine dont nous allons parler n'est pas la seule application en grand du procédé Fixary ; elle résume les perfectionnements réalisés dans son emploi, tant en France qu'à l'étranger, et notamment à Bruxelles (Société anglo-belge et Société frigorifique, de Bruxelles), à Cologne (Cristal Eisfabrik), à Lisbonne (Société frigorifique portugaise).

« A Paris même, la Société française de glace pure avait commencé l'application de ce procédé sur une petite échelle ; mais l'usine qui réalisait cette première application est bientôt devenue insuffisante au point de vue de la production, bien qu'elle produisit 24.000 kilogrammes de glace en 24 heures. Elle avait permis toutefois d'apprécier la parfaite qualité de la glace fabriquée par les machines Fixary. On en vint à décider la création d'une usine importante dans laquelle tous les perfectionnements pratiques, indiquée par une expérience de plus d'une année, ont été appliqués. Toutes les parties de cette installation réellement importante ont été étudiées avec soin sous notre direction ; elles portent la production totale de l'usine à 80.000 kilogrammes de glace en 24 heures.

La planche 11-12 donne deux vues d'ensemble de la nouvelle usine, et les dessins de la planche 13-14 en représentent divers appareils spéciaux, entre autres, ceux qui se rattachent spécialement à la fabrication de la glace transparente.

« De même que tous les moyens connus par la production du froid, la fabrication de la glace par les procédés Fixary est basée sur le changement d'état d'un corps. Dans le cas actuel, le froid est obtenu par la détente du gaz ammoniac préalablement liquéfié, puis ramené à l'état liquide par compression, et cela indéfiniment, sans qu'on puisse apprécier une déperdition de gaz ammoniac.

« En outre des moteurs et des générateurs à vapeur du système Farcot, la nouvelle usine se compose essentiellement : 1° de deux compresseurs à ammoniaque B, correspondant chacun à la production de 1000 à 1200 kilogrammes de glace à l'heure ; 2° de deux paires de condenseurs C, ou liquéfacteurs d'ammoniac, pourvus de serpentins en fer d'une seule pièce ; 3° de deux bacs réfrigérants F ou congélateurs, pour effectuer l'évaporation de l'ammoniaque au

thogènes susceptibles de prosperer dans l'eau, résiste à une congélation prolongée, et que la glace des eaux contaminées ne vaut pas mieux pour la santé publique que ces eaux elles-mêmes, et il est présumable qu'un certain nombre d'autres microbes pathogènes résistent avec le même succès. La glace présente donc les mêmes dangers que l'eau dont elle dérive, et pour être sans inconvénient, il faut que l'eau dont elle dérive soit parfaitement pure et inoffensive. C'est dire que la glace récoltée dans le voisinage des villes sera toujours suspecte et que seule la glace des glaciers montagneux, isolés, élevés, ou celle que l'on produit artificiellement, en employant de l'eau distillée ou de l'eau de source reconnue pure, sera exempte d'inconvénients, en ce qui concerne la propagation des maladies infectieuses. »

moyen de serpentins en fer d'une grande longueur, de telle sorte que la très basse température à laquelle ils sont toujours maintenus se communique rapidement au bain incongelable de chlorure de calcium qui les entoure. Il suffit de plonger dans ce bain, pendant un certain temps, des moules remplis d'eau pour obtenir des blocs de glace de dimensions voulues. Parmi les appareils accessoires, on distingue les égoutteurs séparateurs d'huile D et les récipients à ammoniac.

« En second lieu, les appareils à glace pure et transparente comprennent un épurateur de vapeur L, un condenseur de vapeur M, un refroidisseur N, un filtre O, deux pompes à air P, deux pompes alimentaires Q et deux accumulateurs R.

« Les pompes de compression aspirent dans les bacs congélateurs et par les tuyaux *c d*, l'ammoniac dont la détente a déjà produit son effet. Comme cet ammoniac conserve encore à peu de chose près la basse température à laquelle il se trouvait dans les serpentins du bac, nous avons demandé que le tuyau d'aspiration traversât, avant de se rendre à la pompe de compression, l'eau approvisionnée dans le réservoir I pour le remplissage des mouleaux. De cette manière, on utilise une partie du froid de l'ammoniac pour opérer en I un premier refroidissement de l'eau à congeler.

« Après avoir aspiré l'ammoniac détendu, les compresseurs le refoulent par les conduites *e* dans les condenseurs à serpentins C, dits liquéfacteurs, en le faisant passer au préalable dans l'égoutteur à chicanes ou séparateur d'huile D, où il se débarrasse de l'huile entraînée (fig. 3). En raison de sa densité, celle-ci tombe au fond de l'égoutteur, tandis que le gaz ammoniac purifié en sort à la partie supérieure pour pénétrer dans les serpentins des condenseurs. Là, sous l'action combinée de la compression et d'un courant continu d'eau froide, il se liquéfie et se rend, par la conduite *g*, dans le plus haut des deux compartiments du récipient E.

« Du fond de l'égoutteur, l'huile est conduite par un tuyau vertical dans l'autre compartiment de ce récipient, où, grâce à la pression du refoulement, elle peut être renvoyée sous les pistons du compresseur pour assurer le graissage des tiges et l'étanchéité du joint hydraulique des garnitures.

« Le compartiment supérieur du récipient constitue une réserve d'ammoniac liquéfié, qui assure la régularité de la détente. C'est de là que part la conduite *a*, aboutissant au robinet de détente *b*, dont l'ouverture est réglée pour admettre dans le congélateur la quantité d'ammoniac voulue.

« Sous l'aspiration produite par la pompe de compression dans les conduites *c* et *d*, l'ammoniaque se détend et passe à l'état gazeux en produisant un froid intense qui se communique au bain incongelable de chlorure de calcium entourant les serpentins du réfrigérant. Ce bain est agité d'une façon continue

au moyen d'une paire d'hélices commandées par l'arbre de transmission X, et il refroidit à son tour les mouleaux pleins d'eau qui y sont plongés.

« Dans le congélateur, la pression du gaz détendu n'est à ce moment que de deux atmosphères absolues ; ce fluide revient ensuite, par la conduite *c* au bac I, puis, par le tuyau D, dans la pompe de compression où il est de nouveau comprimé et refoulé dans les condenseurs.

« *Circulation d'eau froide dans les condenseurs.* — L'eau froide, circulant autour des serpentius de chaque condenseur pour produire la liquéfaction de l'ammoniaque est prise dans un puits situé entre les deux compresseurs. Deux excentriques calés sur l'arbre de couche de ces derniers actionnent à cet effet deux pompes Y, pouvant débiter 80 m^3 à l'heure. L'eau refoulée est conduite par le tuyau Z dans des réservoirs d'alimentation, placés en dehors de l'usine, plus hauts que les condenseurs. Elle en sort par un tuyau *r* (fig. 4 et 5), qui la conduit au refroidisseur N, d'où elle se rend à la partie supérieure des condenseurs à ammoniac par le tuyau *r'*. Dans le faisceau tubulaire du refroidisseur, chemine, en sens inverse de cette eau de puits, l'eau venant du condenseur de vapeur M ; on abaisse ainsi la température de cette dernière, sans pour cela échauffer, d'une manière sensible (1 degré au plus) l'eau destinée à la condensation de l'ammoniac.

« Dans les condenseurs à ammoniaque, l'échange des températures entre l'eau de puits et les serpentins est facilitée par des agitateurs à palettes, actionnés au moyen d'un arbre de transmission spécial et de renvois convenables. Une fois échauffée, l'eau s'échappe par des trop-pleins placés en haut des condenseurs et se rend, par la conduite *s* à une pompe centrifuge S, qui l'envoie au condenseur à surface M, et, de là, à l'extérieur par le tuyau U. Avant d'être abandonnée, l'eau de puits a donc été utilisée trois fois pour le refroidissement par circulation.

« C'est ici qu'interviennent les appareils de M. de Stoppani pour la fabrication de la glace pure et transparente.

« On a vu plus haut que, dans son troisième et dernier emploi, l'eau de circulation condense la vapeur d'échappement du moteur amenée par le tuyau *h* à l'épurateur L qui la dépouille des traces d'huile entraînée. A la sortie de ce dernier, cette vapeur rencontre en *n'* un jet d'eau froide et pure venant d'un épurateur d'eau de source dont nous expliquons plus loin le fonctionnement. Il résulte de ce mélange que l'eau épurée est portée à la température d'ébullition par la vapeur qui lui abandonne une partie de sa chaleur. La condensation se termine dans le condenseur à surface M, et le mélange passe finalement dans le refroidisseur N, où s'achève le refroidissement. En même temps, les pompes à air P déterminent dans cet appareil, par les tuyaux *p*, un vide d'environ 0,700 *m* de mercure afin de priver l'eau de l'air qu'elle contient.

Le même degré de vide se maintient naturellement dans le condenseur à surface : c'est ainsi que les machines à vapeur employées sont transformées en moteurs à condensation.

« Deux petites pompes alimentaires Q, accouplées aux pompes à air, aspirent la vapeur condensée par le tuyau K, et la refoulent en *l* à travers le filtre O. La pression exercée ainsi sur l'eau à filtrer l'oblige non-seulement à traverser le filtre, mais aussi à se rendre dans l'accumulateur R par la conduite *m*.

« Le filtre est pourvu à sa partie supérieure d'une soupape de sûreté, pour empêcher les chocs qui pourraient se produire, si, pour une cause ou une autre, la circulation de l'eau n'était pas assez rapide.

« Nous avons parlé plus haut d'un épurateur alimentant la conduite *n'* du condenseur M. Il convient de faire remarquer, à ce sujet, que l'eau fournie par la condensation de la vapeur des moteurs, est insuffisante pour l'alimentation des mouleaux à congeler ; il faut ajouter un complément d'eau de source (dans le cas actuel, elle vient de la Dhuys) préalablement purifiée.

« L'épurateur de cette usine est du système Howatson ; son fonctionnement est basé sur l'emploi d'un réactif préparé dans une capacité déterminée et composé d'un mélange d'eau, de chaux éteinte et de soude caustique, en proportions variables suivant la nature de l'eau à épurer. Ce réactif est envoyé par un orifice réglable dans un récipient où arrive également l'eau à épurer. Le mélange, dont les éléments sont en proportions convenables, rencontre alors une série de plans inclinés destinés à favoriser la décantation des précipités calcaires qui se sont formés, et un filtre formé d'éponges retient les parties solides en suspension dans l'eau.

« A la sortie du filtre, l'eau épurée est recueillie dans un réservoir d'où elle se rend, comme on l'a vu plus haut, par le tuyau *n'*, au condenseur de vapeur. Un flotteur assure la fermeture automatique du réservoir lorsqu'il est vide et empêche ainsi les rentrées d'air dans le condenseur de vapeur.

« Les cylindres communiquants de l'accumulateur R contiennent chacun un piston, dont la tige est reliée par une chaîne à un robinet qui ferme automatiquement les pompes alimentaires en cas de trop plein. A chaque ouverture de l'un des robinets *o*; le poids de ce piston et la position élevée de l'accumulateur déterminent l'envoi d'eau sous pression, dans le récipient I (fig. 2), par le tuyau *n*. Cette eau, toute préparée pour la fabrication de la glace pure et transparente, se rend ensuite par les appareils *o* dans les mouleaux.

« Grâce au faisceau tubulaire traversé par le retour d'ammoniaque, l'eau contenue dans le récipient I subit un premier abaissement de température, qui favorise beaucoup la transparence de la glace. L'expérience a prouvé, en effet, qu'un trop grand écart entre la température de l'eau, au moment où elle est plongée dans le bain incongelable et le bain lui-même, amène, par suite de la trop grande rapidité du refroidissement, une sorte de cristallisation, qui trouble

l'équilibre des molécules. Il en résulte des cassures infinitésimales, qui donnent à la glace un aspect opaque, peu agréable à l'œil.

« Au contraire, si la congélation se fait, comme dans le cas actuel, sans transition brusque de température, on obtient un produit dont la transparence ne le cède en rien à la glace naturelle.

« Dans certains cas, on a recherché simplement cette transparence par une lente congélation de l'eau non épurée et non distillée, en maintenant la température des bacs de congélation à 1 ou 2° au-dessous de zéro ; non seulement la transparence obtenue par ce moyen était défectueuse, mais encore cette congélation lente nécessite des bacs d'une capacité impraticable et d'un prix trop élevé ; de plus, l'eau ordinaire n'avait aucune des garanties de pureté offertes par celle qui a subi les opérations précédemment décrites.

« Dans l'usine de la Société française de glace pure, on a pris les dispositions les plus judicieuses pour la manœuvre rapide et sûre des mouleaux. Le mécanisme au moyen duquel on procède facilement au démoulage des châssis, une fois la congélation obtenue, consiste en un treuil roulant actionné par un jeu de poulies et de transmissions à corde. On voit dans les figures 1 et 2 l'ensemble de l'appareil de levage qui est, d'autre part, représenté en détail dans les figures 8 et 10.

« La commande motrice vient de la transmission V, placée au-dessus du bac refroidisseur I ; cette installation est double, et le mouvement est communiqué à chacun des treuils roulants G par l'intermédiaire d'un câble sans fin allant passer, à l'arrière du bassin de congélation, autour d'une seconde transmission de commande X ; celle-ci reçoit son mouvement de la précédente à l'aide d'un câble, et sert aussi à actionner les agitateurs à hélice. Ses deux poulies réceptrices ont un support spécial, qui peut se déplacer sous l'action d'un contrepoids ou tendeur, afin de compenser l'allongement du câble.

« Dans chaque treuil roulant, la poulie de commande peut être rendue à volonté, fixe ou folle sur son arbre V au moyen d'un embrayage à volant, et le câble passe en boucle sur deux poulies, qui actionnent les mécanismes de propulsion et de déplacement de la charge. Ces mécanismes, sensiblement analogues, consistent en une paire d'engrenages coniques tournant continuellement en sens inverse sous l'action d'un pignon commun.

« L'ouvrier fait, à l'aide du levier *a* d'un embrayage à friction, circuler le chariot roulant sur les files de rails placés au-dessus du bac. Un autre levier *b* commande au moyen d'un embrayage denté deux chaînes qui permettent de suspendre, d'élever ou d'abaisser un châssis de vingt mouleaux de glace, pesant chacun 25 kilogrammes.

« Le démoulage se fait en vingt minutes de la manière suivante : on élève au-dessus du bac le premier châssis de l'avant, dont les mouleaux sont à l'état de congélation complète, on avance ce châssis au-dessus de la cuve à eau chaude H,

Le même degré de vide se maintient naturellement dans le condenseur à surface : c'est ainsi que les machines à vapeur employées sont transformées en moteurs à condensation.

« Deux petites pompes alimentaires Q, accouplées aux pompes à air, aspirent la vapeur condensée par le tuyau K, et la refoulent en *l* à travers le filtre O. La pression exercée ainsi sur l'eau à filtrer l'oblige non-seulement à traverser le filtre, mais aussi à se rendre dans l'accumulateur R par la conduite *m*.

« Le filtre est pourvu à sa partie supérieure d'une soupape de sûreté, pour empêcher les chocs qui pourraient se produire, si, pour une cause ou une autre, la circulation de l'eau n'était pas assez rapide.

« Nous avons parlé plus haut d'un épurateur alimentant la conduite *n'* du condenseur M. Il convient de faire remarquer, à ce sujet, que l'eau fournie par la condensation de la vapeur des moteurs, est insuffisante pour l'alimentation des mouleaux à congeler ; il faut ajouter un complément d'eau de source (dans le cas actuel, elle vient de la Dhuys) préalablement purifiée.

« L'épurateur de cette usine est du système Howatson ; son fonctionnement est basé sur l'emploi d'un réactif préparé dans une capacité déterminée et composé d'un mélange d'eau, de chaux éteinte et de soude caustique, en proportions variables suivant la nature de l'eau à épurer. Ce réactif est envoyé par un orifice réglable dans un récipient où arrive également l'eau à épurer. Le mélange, dont les éléments sont en proportions convenables, rencontre alors une série de plans inclinés destinés à favoriser la décantation des précipités calcaires qui se sont formés, et un filtre formé d'éponges retient les parties solides en suspension dans l'eau.

« A la sortie du filtre, l'eau épurée est recueillie dans un réservoir d'où elle se rend, comme on l'a vu plus haut, par le tuyau *n'*, au condenseur de vapeur. Un flotteur assure la fermeture automatique du réservoir lorsqu'il est vide et empêche ainsi les rentrées d'air dans le condenseur de vapeur.

« Les cylindres communiquants de l'accumulateur R contiennent chacun un piston, dont la tige est reliée par une chaîne à un robinet qui ferme automatiquement les pompes alimentaires en cas de trop plein. A chaque ouverture de l'un des robinets *o*; le poids de ce piston et la position élevée de l'accumulateur déterminent l'envoi d'eau sous pression, dans le récipient I (fig. 2), par le tuyau *n*. Cette eau, toute préparée pour la fabrication de la glace pure et transparente, se rend ensuite par les appareils *o* dans les mouleaux.

« Grâce au faisceau tubulaire traversé par le retour d'ammoniaque, l'eau contenue dans le récipient I subit un premier abaissement de température, qui favorise beaucoup la transparence de la glace. L'expérience a prouvé, en effet, qu'un trop grand écart entre la température de l'eau, au moment où elle est plongée dans le bain incongelable et le bain lui-même, amène, par suite de la trop grande rapidité du refroidissement, une sorte de cristallisation, qui trouble

l'équilibre des molécules. Il en résulte des cassures infinitésimales, qui donnent à la glace un aspect opaque, peu agréable à l'œil.

« Au contraire, si la congélation se fait, comme dans le cas actuel, sans transition brusque de température, on obtient un produit dont la transparence ne le cède en rien à la glace naturelle.

« Dans certains cas, on a recherché simplement cette transparence par une lente congélation de l'eau non épurée et non distillée, en maintenant la température des bacs de congélation à 1 ou 2° au-dessous de zéro ; non seulement la transparence obtenue par ce moyen était défectueuse, mais encore cette congélation lente nécessite des bacs d'une capacité impraticable et d'un prix trop élevé ; de plus, l'eau ordinaire n'avait aucune des garanties de pureté offertes par celle qui a subi les opérations précédemment décrites.

« Dans l'usine de la Société française de glace pure, on a pris les dispositions les plus judicieuses pour la manœuvre rapide et sûre des mouleaux. Le mécanisme au moyen duquel on procède facilement au démoulage des châssis, une fois la congélation obtenue, consiste en un treuil roulant actionné par un jeu de poulies et de transmissions à corde. On voit dans les figures 1 et 2 l'ensemble de l'appareil de levage qui est, d'autre part, représenté en détail dans les figures 8 et 10.

« La commande motrice vient de la transmission V, placée au-dessus du bac refroidisseur I ; cette installation est double, et le mouvement est communiqué à chacun des treuils roulants G par l'intermédiaire d'un câble sans fin allant passer, à l'arrière du bassin de congélation, autour d'une seconde transmission de commande X ; celle-ci reçoit son mouvement de la précédente à l'aide d'un câble, et sert aussi à actionner les agitateurs à hélice. Ses deux poulies réceptrices ont un support spécial, qui peut se déplacer sous l'action d'un contrepoids ou tendeur, afin de compenser l'allongement du câble.

« Dans chaque treuil roulant, la poulie de commande peut être rendue à volonté, fixe ou folle sur son arbre V au moyen d'un embrayage à volant, et le câble passe en boucle sur deux poulies, qui actionnent les mécanismes de propulsion et de déplacement de la charge. Ces mécanismes, sensiblement analogues, consistent en une paire d'engrenages coniques tournant continuellement en sens inverse sous l'action d'un pignon commun.

« L'ouvrier fait, à l'aide du levier *a* d'un embrayage à friction, circuler le chariot roulant sur les files de rails placés au-dessus du bac. Un autre levier *b* commande au moyen d'un embrayage denté deux chaînes qui permettent de suspendre, d'élever ou d'abaisser un châssis de vingt mouleaux de glace, pesant chacun 25 kilogrammes.

« Le démoulage se fait en vingt minutes de la manière suivante : on élève au-dessus du bac le premier châssis de l'avant, dont les mouleaux sont à l'état de congélation complète, on avance ce châssis au-dessus de la cuve à eau chaude H,

où on le plonge ensuite pour arriver à décoller la glace des moules. Après quoi on sort puis on renverse ce châssis, à l'aide d'un support mobile autour d'un axe horizontal. Les blocs de glace quittent alors leurs mouleaux et tombent d'eux-mêmes sur le plan incliné J, d'où ils sont enlevés pour les livrer à la consommation (Fig. 1 et 2).

« L'opération se termine par le remplissage des mouleaux au moyen d'eau pure amenée à l'abri de l'air par les tuyaux en caoutchouc adaptés aux robinets *o*. Il reste finalement à transporter le premier châssis en arrière du bac, jusqu'à la place laissée libre par l'avancement mécanique sur des galets de tous les châssis suivants. Une crémaillère mue par une manivelle *k* permet, pendant le retour du châssis nouvellement rempli d'eau, de faire avancer tout l'ensemble des mouleaux de façon à ménager à ce châssis une place qu'il cédera à son tour au suivant, et qui progresse ainsi pour arriver de nouveau au premier rang où la congélation est complète.

« La glace retirée de chaque châssis présente la transparence et la limpidité du cristal de roche, en même temps qu'une grande capacité.

« Telle est, dans son ensemble et dans ses détails, la nouvelle usine dont les travaux, comprenaient, en outre de l'agencement, des appareils décrits plus haut : 1° l'exécution de nouveaux bâtiments pour une glacière capable d'emmagasiner 6 à 700,000 kilogrammes de glace; 2° l'installation de deux générateurs Farcot, à chaudière semi-tubulaire, ayant chacun $60^{m},2$ de surface de chauffe, et le montage de deux machines à vapeur Farcot, à 4 tiroirs, de 50 chevaux chacune; 3° le forage d'un puits d'alimentation de 100 mètres de profondeur, et la pose des pompes de circulation d'eau. Tous ces travaux ont été exécutés dans une période de huit mois. »

Dans le système de *Lavergne* (1), figure 142, la vapeur, traverse, avant d'arriver au condenseur, de l'eau dans laquelle elle barbotte en abandonnant presque toute sa graisse, puis un filtre de noir animal ou de charbon. L'eau condensée descend, au travers d'un vase à niveau constant et ouvert à l'air libre, dans un refroidisseur Beaudelot. De là, elle passe dans un réservoir collecteur, où elle dépose ses dernières impuretés, et du haut duquel elle se rend dans un accumulateur en bois fermé par un flotteur et communiquant avec le remplissage des mouleaux.

On peut, d'ailleurs, lorsqu'on craint de ne pas arriver à se débarrasser entièrement des graisses, utiliser la vapeur d'échappement d'une façon indirecte, en lui faisant chauffer de l'eau préalablement filtrée. Cette eau passe autour des tubes d'un condenseur à surfaces traversés par la vapeur d'échappement, où elle bout à 70° environ, sous le vide déterminé par une pompe à air ; on refroidit ensuite

1. Brevet anglais 14440 de 1887.

cette eau, filtrée et privée d'air, avant de l'envoyer aux mouleaux. Il est rare que

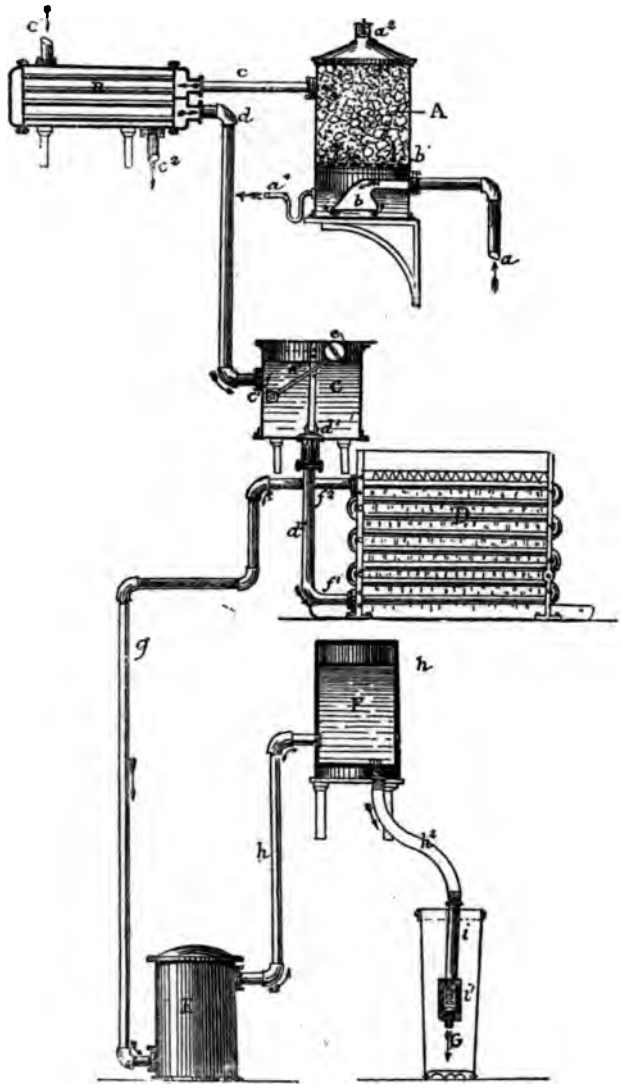


Fig. 142. — *Lavergne* (1887). Fabrication de la glace transparente par la vapeur d'échappement.

a, arrivée de la vapeur par un joint hydraulique *b a'* dans le filtre A de noir animal chargé sur la tôle perforée *b'*, et pourvu d'un reniflard a^2. B, condenseur à surfaces avec circulation d'eau *c' c²*, amenant par *c' d f* la vapeur de A condensée au réservoir C, à soupape de vidange *d'*, commandée par le flotteur (*c' e c²*), D, refroidisseur Beaudelot amenant en d^2 *f'* l'eau chaude de C et la conduisant par f_2 *g* au collecteur E, d'où elle passe, refroidie et purifiée, par *h*, à l'accumulateur en bois F, à piston *h'*. Cet accumulateur renvoie l'eau, par h_2 *i*, au bec à clapet *c'* immergé au fond du moulet G, de manière à le remplir sans entrée d'air.

la vapeur d'échappement suffise seule pour chauffer l'eau à une température convenable ; mais il est facile d'y suppléer par une prise de vapeur sur la chaudière.

Parmi les autres procédés moins importants proposés pour la fabrication de la glace transparente, je citerai la formation des blocs par couches successivement congelées [1] ou *per descensum*, c'est-à-dire en laissant la glace se former lentement en se propageant du fond d'un récipient à liquide incongelable flotté sur l'eau à congeler [2].

La fabrication de la glace comporte en outre l'emploi d'un certain nombre de mécanismes accessoires pour l'avancement, le remplissage et le démoulage : nous n'insisterons pas sur ces appareils d'ordre purement mécanique, et que chaque constructeur établit à sa convenance.

Quant au prix de revient de la glace au sortir des mouleaux, il oscille, suivant l'importance de l'installation, entre 6 francs et 10 francs la tonne avec les bonnes machines à compression.

Fabrication de l'air froid

L'une des applications les plus intéressantes des machines à froid est le refroidissement de l'air : la fabrication d'air froid, que l'on applique ensuite à diverses opérations telles, par exemple, que la conservation des viandes, le refroidissement des salles de réunion.

Les machines à air ont incontestablement le grand avantage de produire l'air froid directement : elles rachètent en partie par leur simplicité la faiblesse de leur rendement, et cette qualité paraît devoir leur conserver quelque temps encore le monopole des navires [3].

A terre, où l'on se procure facilement l'agent chimique nécessaire au fonctionnement des machines à liquéfaction, où l'espace ne manque pas et où l'on tient plus à l'économie du combustible, on a cherché depuis longtemps à produire l'air froid indirectement, en bénéficiant de l'économie des machines à gaz liquéfiés.

Dans les systèmes proposés par MM. Rouart, Osenbrück et Linde [4], c'est par son passage sur des mèches, des toiles métalliques ou des disques en rotation imbibés ou arrosés de liquide incongelable refroidi, ou même à travers une mince couche de ce liquide [5] que l'on refroidit l'air ; mais ce procédé a l'incon-

1. Linde. *The Engineer*, 17 sept. 1880, p. 211.
2. Gorrie Gamgee. Brevets anglais 13234, 4519 de 1850 et 1875. On peut, dans certains cas, utiliser directement le froid produit par la détente de l'air des moteurs à air comprimé : procédé *Popp* et distribution de Birmingham. — Brevet anglais 5271 de 1888. Marcet et Ellis.
3. Kirk. Brevet anglais 2235 de 1864. — Gamgee, Brevet anglais 3682 de 1875.
4. G. Behrend, *Eismaschinen*, p. 280 et brevet anglais Linde, 11849 de 1889.
5. Mignon et Rouart. *Comptes rendus*, 18 octobre 1875. Brevet anglais 5219 de 1882.

vénient d'obliger à l'entretien du liquide. On préfère, en général, se contenter de la circulation d'une grande masse de liquide incongelable toujours le même, et faisant comme un volant de froid, dans une série de tuyaux fixés au plafond de la salle à refroidir, et qu'il faut dégivrer de temps en temps.

Je citerai, dans cet ordre d'idées, les tuyaux des machines de Lavergne, à ailettes (fig. 143), comme ceux de certains calorifères, dans lesquels ce n'est pas le liquide incongelable mais, ainsi que dans les appareils de M. Schmitz (1884), le gaz ammoniac détendu lui-même qui circule indéfiniment. Leurs joints à brides vissées et soudées résistent à 70 atmosphères.

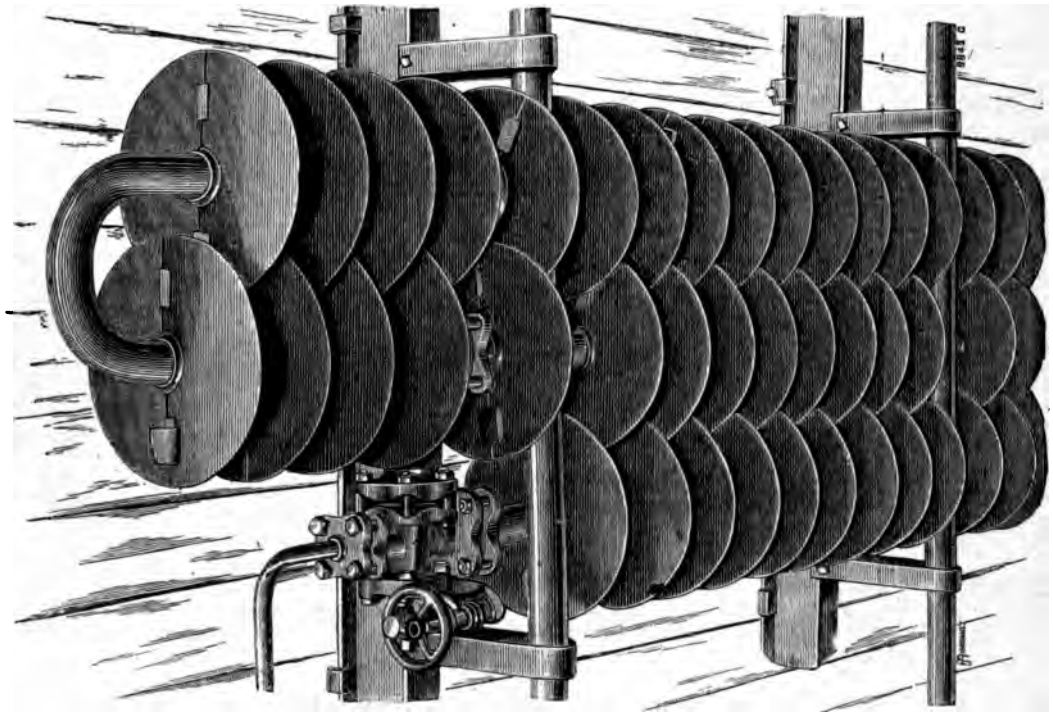


Fig. 143. — *Lavergne.* Tuyaux à ailette pour circulation du gaz ammoniac détendu.

Une autre solution consiste à refroidir l'air dans un appareil *frigorifère*, par son passage autour ou à l'intérieur de tubes parcourus par un liquide incongelable refroidi. Dans l'appareil de *Chambers* (1), figure 144, l'air traverse successivement une série de réfrigérants à tubes en U, autour desquels circule le liquide incongelable : il dépose son eau et sa glace dans le premier réfrigérant et

1. Brevet anglais 1984 de 1882.

achève de se refroidir dans les autres, qu'il givre peu à peu. On opère le dégivrement en faisant passer de temps en temps, en sens inverse du courant normal, une chasse d'air chaud ou de vapeur dans les tubes givrés, qui reprennent ainsi leur activité première.

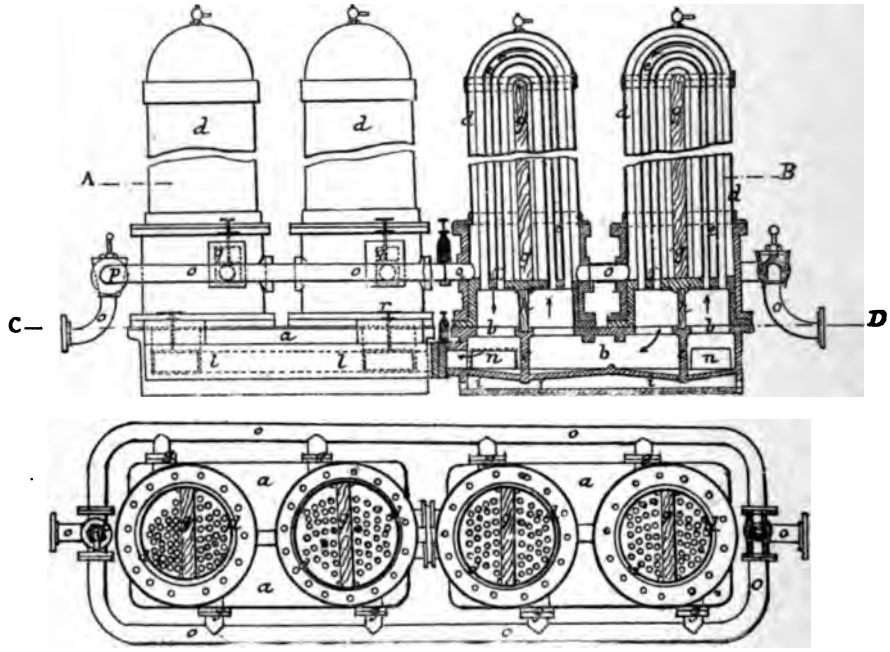


Fig. 144. — *Chambers. Frigorifère.*

o o, tuyau à robinets *p* faisant circuler du liquide incongelable froid autour des tubes *e e* dans les frigorifères *d*. *g h c* cloisons séparant en deux compartiments *b b* les faisceaux tubulaires *e c*. *l l* conduits amenant l'air à refroidir, par les bouches *n*, à vannes *r*, aux tubes *b*, dans lesquels il circule suivant les flèches. *i k*, évacuation de l'eau précipitée dans les tubes *cc*. Le jeu des vannes *q* et *r* permet de régler et de diriger à volonté les courants d'air et de liquide incongelable.

M. *Fixary* (1) opère au contraire ce dégivrement méthodiquement au moyen de l'air même à refroidir, utilisant ainsi le givre, autrefois une cause de perte. La théorie de son appareil est fort simple. Imaginons deux compartiments à serpentins séparés ; désignons-les par A et B. A l'origine, l'air à refroidir passe de A sur B, puis dans la chambre froide, et le gaz ammoniac détendu dans A seulement. Dès que A se givre, on renverse à la fois le courant d'air et la circulation d'ammoniac, de sorte que l'air fond d'abord le givre de A, qui s'écoule

1. Brevet anglais 3793 de 1887. — Dans ses premiers appareils (1876), M. Fixary obtenait le dégivrement mécaniquement au moyen de brosses ou des rachettes tournantes, nettoyant sans cesse les serpentins de forme cylindrique. Ce mode de dégivrement vient d'être appliqué sous une forme analogue par MM. Rouart frères (Société d'encouragement, séance du 24 janvier 1890). Voir aussi les brevets anglais Linde 10918, et 15124 de 1889, 1875 de 1890.

hors de l'appareil. L'air achève ensuite de se refroidir sur B, seul parcouru par la circulation d'ammoniac. L'action de l'appareil est d'autant plus vive, et le dégivrement d'autant plus rapide, qu'il faut moins abaisser la température de

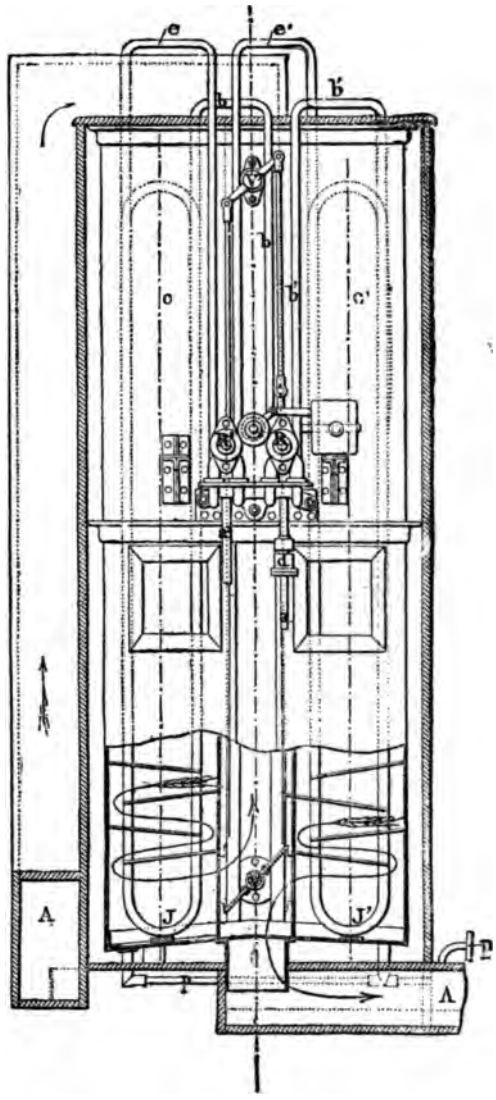


Fig. 145. — Frigorifère Fixary.

Légende.

Cet appareil se compose essentiellement de trois serpentins, dont deux, J et J', sont indiqués sur la figure ci-jointe, enfermés dans les compartiments C et C' d'une caisse en bois recouverte d'une enveloppe non conductrice.

Le gaz ammoniac liquéfié, dont la détente est destinée à produire le froid nécessaire pour refroidir l'air, est amené de la pompe à ammoniac au tuyau *a*, qui le fait communiquer, à travers le détendeur *d*, avec des robinets R et R', disposés de façon à pouvoir faire passer l'ammoniac détendu alternativement dans l'un ou l'autre des serpentins.

Dans l'état représenté sur la figure, c'est le serpentin J' qui est traversé par l'ammoniac réfrigérant, lequel retourne à l'aspiration de la pompe par les tuyaux C' et A'. L'air, aspiré dans la salle à refroidir par un ventilateur qui le refoule dans l'échangeur en A, traverse le compartiment C du haut en bas autour du serpentin inactif J, puis le compartiment C', sur lequel il est dévié par le jeu de vannes V' V, et revient dans la salle par A', après s'être refroidi autour du serpentin actif J'.

Lorsque le serpentin actif J' est recouvert de givre, on renverse simultanément les positions des robinets R R' et des vannes V V', de manière à faire passer la circulation d'ammoniac seulement dans le serpentin J, qui n'a pas de givre, en même temps que l'on change le sens du courant d'air, en le faisant passer de A en C', puis du bas de C' en C, qu'il traverse de haut en bas, pour revenir par A' dans la chambre à refroidir.

Lorsque le second serpentin s'est à son tour couvert de givre, on rétablit les choses dans la position figurée, et ainsi de suite, de sorte que l'air à refroidir, amené d'abord sur le serpentin inactif couvert de givre, commence à se refroidir en fondant ce givre, puis continue à se refroidir sur le serpentin actif, dont la surface n'a pas de givre.

Derrière ces deux serpentins, qui ont pour but de débarrasser l'air de son humidité et de fondre le givre accumulé par cette humidité sur les surfaces refroidissantes, se trouve un troisième serpentin, de plus grande surface, toujours actif, dans lequel la détente du gaz agit continuellement. L'air, après avoir léché la surface des deux premiers serpentins, arrive, complètement sec et à la température de 3 à 4 degrés au-dessous de zéro, sur la surface de ce troisième serpentin, où il achève de se refroidir à une température très basse, sans formation de givre sensible, les deux premiers serpentins ayant absorbé toute l'humidité contenue dans l'air en circulation.

En un mot, dans l'appareil Fixary, le liquide réfrigérant circule toujours dans des serpentins à surfaces parfaitement conductrices, en contact immédiat avec l'air à refroidir, et le givre qui reste sur le serpentin inactif, loin d'être un obstacle, concourt au refroidissement. L'eau distillée qui provient de la fusion de ce givre, et qui peut être utilisée, est évacuée par un purgeur *p*.

Au bout d'un certain temps, l'air de la chambre à refroidir aura abandonné à l'échangeur presque toute son humidité; on peut alors faire traverser les trois serpentins à la fois par l'ammoniac détendu, et augmenter ainsi l'étendue des surfaces réfrigérantes en activité.

l'air ; aussi cet appareil donne-t-il d'excellents résultats quand il faut refroidir de grandes masses d'air aux environs de zéro. D'ailleurs, pour atteindre les basses températures, M. Fixary obtient un dégivrement très rapide en faisant circuler dans l'intérieur des serpentins de l'ammoniac pris au refoulement du compresseur. En outre, l'expérience a démontré l'utilité d'un troisième serpentin, parcouru constamment par l'ammoniac détendu, jamais givré, et sur lequel l'air refroidi et séché par les deux premiers serpentins achève de se refroidir. Des expériences exécutées en grand en France et en Allemagne donnent lieu de croire que cet appareil répondra aux espérances de son inventeur et permettra de réaliser avec économie la production industrielle et la distribution de l'air froid sec : d'importantes applications ne tarderont pas à fixer l'opinion sur sa valeur pratique.

Comme exemple d'installation de frigorifère Fixary nous empruntons aux *Annales Industrielles* du 20 janvier 1889, la description suivante: (pl. 19-20).

« Une installation du système Fixary, pour produire le froid et la glace, en renouvelant l'air de la chambre à froid, a été récemment construite par les *Ateliers Humboldt*, à Kalk, près Cologne. Nous la publions ci-après, d'après la *Zeitschrift des Vereines deustchen Ingenieure*.

« *Principe de l'appareil.* — La partie essentielle de l'innovation dont il s'agit consiste à placer un appareil frigorifique à plusieurs compartiments *en dehors* de la chambre qu'il s'agit de maintenir à une température basse, et contenant des matières pouvant se détériorer par la chaleur. Dans chaque compartiment de cet appareil, on dispose un serpentin en fer, dans lequel se vaporise un liquide (ammoniaque, acide carbonique, acide sulfureux, etc.) venant de la machine qui produit le froid. On obtient par cette vaporisation l'abaissement voulu de la température ambiante. L'air qui circule autour du

serpentin ne se refroidit pas seulement au-dessous de zéro, mais il dépose toute son humidité, en forme de givre, sur le pourtour du tuyau, et sort complètement sec de l'appareil frigorifique.

« Après quelque temps de fonctionnement, cet appareil frigorifique se recouvre d'une telle couche de givre qu'il devient impropre pour un travail utile; il s'agit alors de faire fondre ce givre et de faire circuler l'air chaud autour d'un serpentin non encore recouvert de givre. Pour cela, on est obligé de faire passer le liquide qui se vaporise, et qui produit le froid, du tuyau entouré de givre dans celui qui ne l'est pas. De même, la marche de l'air doit être réglée de telle sorte qu'il arrive d'abord en contact avec le premier serpentin, en séparant le givre qui est reçu sous forme d'eau dans le premier réservoir, et passe ensuite autour du deuxième serpentin qui, finalement, se recouvre aussi de givre. On effectue après cela l'opération inverse, etc.

« *Détails de l'appareil.* — L'appareil frigorifique est constitué par une caisse oblongue en tôle mince, séparée en quatre compartiments dont les cloisons, ainsi que les parois extérieures, sont entourées d'un corps mauvais conducteur de la chaleur. Dans chaque compartiment, on a placé un serpentin en fer d'une seule pièce.

« En dehors de la caisse, les quatre serpentins sont reliés à un tuyau horizontal au moyen de brides et de robinet, de sorte que chaque serpentin puisse être rempli ou vidé à volonté. Des cloisons mobiles vers l'extérieur permettent le réglage du courant d'air qui circule dans la caisse avec une certaine vitesse obtenue à l'aide d'un ventilateur. Comme il n'existe aucune soudure dans les tuyaux en serpentin, l'air refroidi ne peut pas être vicié par les vapeurs sortant du tuyau. La caisse contenant les tuyaux en serpentin est disposée obliquement afin de rendre possible l'écoulement de l'eau provenant de la fusion du givre.

« L'action de l'appareil réfrigérant peut être expliquée aisément en considérant le moment qui suit le changement de marche du courant d'air dont il a été question plus haut.

« Appelons les compartiments successifs qui contiennent chacun un serpentin, les compartiments I, II, III, IV (fig. 4, 5 et 6, pl. 19 et 20); les deux premiers étant placés en haut de la caisse, les deux derniers au-dessous. L'air chaud et humide, qui est aspiré par le ventilateur de la chambre à refroidir, est refoulé par le même ventilateur dans les compartiments I, II et III, d'où il passe, refroidi et desséché, dans la conduite de refoulement du réfrigérant. Le serpentin I est entièrement recouvert de givre, par suite de l'opération ayant précédé celle que nous considérons. Mais il ne contient plus de vapeurs ammoniacales, puisqu'il est séparé du réservoir renfermant l'ammoniaque. Par contre, le serpentin II est entièrement libre de givre, et là s'évaporent les vapeurs ammoniacales produisant le froid. Il en est de même du serpentin III

(placé au-dessus du serpentin II). Le compartiment et le serpentin IV n'entrent en action que plus tard. L'air chaud fait fondre graduellement le givre qui entoure le serpentin I. L'eau de fusion s'écoule au bas du compartiment I. Dès que l'air pénètre en II, où l'ammoniaque absorbe sa chaleur, cet air ne se refroidit pas seulement avec rapidité, mais il dépose aussi toute sa vapeur d'eau sur le serpentin en forme de givre. Le compartiment et le serpentin III complètent le refroidissement et le dessèchement de l'air. La fusion du givre entourant le serpentin I se fait rapidement; le recouvrement de givre des serpentins II et III dure, selon les circonstances locales, 4, 8 et 12 heures, et même plus longtemps.

« Cette durée est, du reste, facile à déterminer pour chaque cas particulier. Mais, comme les serpentins II et III deviennent inutilisables pendant ce temps, on est obligé d'effectuer le changement de marche du courant d'air en fermant l'accès de l'ammoniaque dans les serpentins II et III, et en le laissant circuler dans les serpentins I et IV (celui-ci est placé au-dessous de celui-là); l'air passe de II, I, puis en IV, et ainsi de suite.

« Pour faire fondre le givre qui entoure le serpentin III, on peut se servir avantageusement d'un jet de vapeur; après quoi ce serpentin est prêt à remplacer le serpentin IV devenu à son tour impropre à produire le froid.

« Dans certaines applications où l'air ne doit pas être refroidi au-dessous de zéro, comme dans certaines opérations de brasseries, l'appareil peut être muni de trois compartiments seulement.

« D'après les expériences effectuées par le constructeur, la durée entre deux changements de marche du courant d'air est assez longue pour qu'on puisse opérer ce changement à la main.

« On a trouvé que l'ammoniaque doit pouvoir se détendre dans les serpentins jusqu'à une tension de 2,3 atmosphères. La température correspondante est de — 15°. La température de l'air sortant de l'appareil réfrigérant varie naturellement avec son volume; elle est de — 1° à — 4°. L'échauffement de l'air traversant les conduites qui mènent à la chambre réfrigérante n'est pas sensible. La température et la quantité de l'air ont pu être aisément réglées, de manière que la température de la chambre froide, de 650 mètres cubes de capacité, ait pu être maintenue à + 1° et + 5° au maximum, ce qui est suffisant pour le but qu'on se proposait.

« De plus, on a pu constater que l'appareil réfrigérant utilisait 90 % du froid produit par la volatilisation de l'ammoniaque; c'est un rendement qui n'a pas encore été atteint jusqu'ici dans les appareils similaires.

« L'installation représentée, pl. 19 et 20, est prévue pour un travail de 10,000 calories à l'heure, obtenu à l'aide d'un compresseur d'ammoniaque, mû par transmission de courroies, qui aspire les vapeurs ammoniacales des serpentins, les comprime et les refoule vers le condenseur (voir la légende des planches

dans lequel les vapeurs comprimées sont refroidies au moyen d'eau froide venant du dehors. Avant que ces vapeurs n'arrivent dans le condenseur, elles passent dans un récipient destiné à recueillir l'huile de graissage que les vapeurs emportent en traversant le cylindre du compresseur.

« Cette huile est reçue dans un réservoir commun d'huile et d'ammoniac liquide. Ces deux liquides, ne pouvant pas se mélanger, on conduit l'huile dans le presse-étoupes et à la conduite aspirante du condenseur, tandis que l'ammoniaque est répartie entre les serpentins de l'appareil réfrigérant. L'installation est complétée par un appareil de distillation avec pompe alimentaire, destiné à la production de l'ammoniaque anhydre, au moyen de sel ammoniac que l'on trouve dans le commerce.

« L'eau fraîche, nécessaire pour le condenseur d'ammoniaque, est pompée au moyen d'une pompe centrifuge (fig. 3). Au-dessus, on a placé le ventilateur qui refoule l'air dans l'appareil réfrigérant. »

Conservation des viandes

L'application des machines frigorifiques à la conservation des viandes prend chaque jour une plus grande importance. Presque abandonnée en France à la suite d'essais malheureux, cette industrie prospère aujourd'hui et se développe rapidement en Allemagne, en Angleterre et en Belgique, principalement pour l'importation des viandes fraîches d'Amérique et d'Australie. En Angleterre, l'importation des viandes gelées s'est élevée, pour 1887, à plus de 69,000 tonnes de bœuf et de mouton (1).

La putréfaction de la viande n'étant qu'un cas particulier de fermentation organique, nous avons cru intéressant de formuler avec quelques détails les principales observations faites en 1884-1885, par MM. *Coleman* et *Mac Kendrick* sur l'action du froid sur les microphytes (2).

On employa pour ces expériences une machine Bell-Coleman de 50^{m3} à l'heure, qui envoyant son air froid dans une conduite maîtresse en bois pourvue de trappes débouchant sur une douzaine de compartiments de 90 litres environ, dont on pouvait régler la température à volonté.

1. En 1888, on a importé en Angleterre 940,000 moutons de la Nouvelle-Zélande, 108,000 d'Australie, 908,000 de la République Argentine. (Bellet, *Revue scientifique*, 29 juillet 1889, p. 114). *Bulletin de la Société d'Encouragement*, mars 1877.) On compte actuellement en Allemagne, 12 villes pourvues d'etablissement de conservation frigorifique, dont le plus important est celui de Crefeld, page 271.

2. The Mechanical Production of Cold and the Effets of Cold upon Microphytes. — Royal Institution, 29 Mai 1886.

Les expériences consistaient à exposer aux basses températures des substances putrescibles renfermées hermétiquement dans des tubes, dans des boîtes d'étain scellées, ou dans des flacons bouchés par des tampons d'ouate ; on les laissait ensuite se dégeler, puis on les maintenait dans une chambre à 27° environ. On ouvrait ensuite ces récipients et on en examinait les substances avec des microscopes d'un grossissement variant de 250 à 1000 diamètres.

Les résultats généraux de ces expériences ont été les suivants :

1° La viande enfermée dans des boîtes en étain de 115 millimètres de diamètre et de 25 millimètres d'épaisseur, exposée à un froid de — 63° pendant six heures se putréfie avec dégagement de gaz. La viande exposée au froid se putréfie néanmoins plus lentement dans la chambre chaude que la viande non gelée.

On expérimenta, le 24 décembre 1884, 30 échantillons de viandes fraîches enfermés dans des flacons en verre blanc de deux onces (60 grammes) bouchés avec soin au vernis et à la cire chaude fondue : ces flacons, divisés en cinq groupes de six, A B C D E, subirent les opérations suivantes :

A exposée pendant	65 heures à	— 17°
B	—	— 29°
C	—	— 34°
D	—	— 40°
E	—	— 62°

Après avoir retiré ces flacons on en exposa de nouveau un de chaque série au froid intense de — 33° pendant 12 heures. Les viandes gelées avaient une couleur noir, mais elles reprenaient bientôt leur aspect naturel dans la chambre chaude. Tous les échantillons commençaient à s'y putréfier après une douzaine d'heures.

Lorsqu'on gèle un muscle d'animal fraîchement tué, la gelé empêche la coagulation du plasma musculaire que l'on peut extraire du muscle en le pressant après l'avoir dégelé : MM. Coleman et Mac Kendrik en concluent qu'il serait intéressant d'étudier l'action d'un froid très vif sur un animal fraîchement tué, n'ayant pas encore atteint la rigidité cadavérique. Des chairs d'un lapin soumis dans ces conditions à une température de — 63°, en partie dégelées, puis regelées ensuite pendant 12 heures, se putréfiaient facilement dans la chambre chaude plus rapidement que les viandes ordinaires.

Une température de — 63° prolongée pendant plusieurs jours sur des flacons bouchés au coton est impuissante à stériliser les matières organiques urine, lait, etc., elle ne peut que retarder la fermentation. On essaya également en vain de tuer les microbes par des altercations répétées de dégel et de regel aux très basses températures, qui transforment la matière organique en une masse compacte, dure comme du bois et souvent friable. En conséquence, MM. Coleman

et Mac Kendrick considèrent comme impraticable la stérilisation des matières organiques même par les froids les plus intenses.

Voici d'ailleurs comment s'exprime à ce sujet M. *Deligny*, président de la commission municipale de ravitaillement de Paris [1].

« Les viandes fraîches contiennent en elles-mêmes les germes qui doivent, après la vie de l'animal, amener la désorganisation rapide de leurs éléments, à laquelle le langage courant donne le nom de putréfaction, et que la science appelle fermentation putride.

« Comme pour la fermentation alcoolique des matières sucrées, les germes ou ferments de la fermentation putride n'agissent qu'après un certain nombre d'heures après la mort, et *avec le concours de la chaleur*. Si la température de la matière organique est suffisamment abaissée, l'action des germes ferments est diminuée, ralentie, ou complètement suspendue. Lorsque cette action a commencé, il est beaucoup plus difficile de l'arrêter et de la suspendre totalement et définitivement par le froid et pendant le froid.

« Le germe n'est pas détruit par le froid ; il entre en action aussitôt que le froid cesse et que la chaleur revient. Ceci est un point essentiel.

« L'abaissement de la température entre 0 et + 3° lorsque cet abaissement a été obtenu pour toute la pièce de viande avant l'entrée en action des germes de putréfaction, assure la conservation et empêche l'action des germes. Lorsque cette action a commencé sans dépasser la période de simple ramolissement que la cuisinière désigne en disant que sa viande est attendrie, l'action des germes peut encore être suspendue pendant quelques jours par un froid très modéré.

« Quand une viande a été portée dans l'entrepôt frigorifique quatre à cinq heures après l'abatage et le dépeçage de l'animal, et qu'elle a été rapidement et totalement ramenée à la température de 0 à + 3 degrés, elle peut être conservée, indéfiniment pour ainsi dire, sans entrer en putréfaction, dans l'entrepôt frigorifique. Avec le temps, le renouvellement incessant de l'air sec desséchera peu à peu cette viande, elle se boucanera, se réduira, prendra un goût de vieux. Elle sera dépréciée, mais restera comestible, sans danger pour la santé.

« Pour que ce résultat soit obtenu dans la température de 0 à + 3 degrés, il faut que les pièces de viande restent isolées les unes des autres et constamment baignées d'air. »

On peut empêcher, en fait, presque indéfiniment la putréfaction des viandes en les maintenant congelées à une très basse température (— 10 à — 15°) bien que cette température ne fasse selon toute apparence qu'engourdir les ferments, mais ce moyen de préservation n'est pas à l'abri de toute critique parce que la viande, une fois dégelée sans précautions spé-

1. *Bulletin municipal officiel*, 6 février et 13 mars 1890.

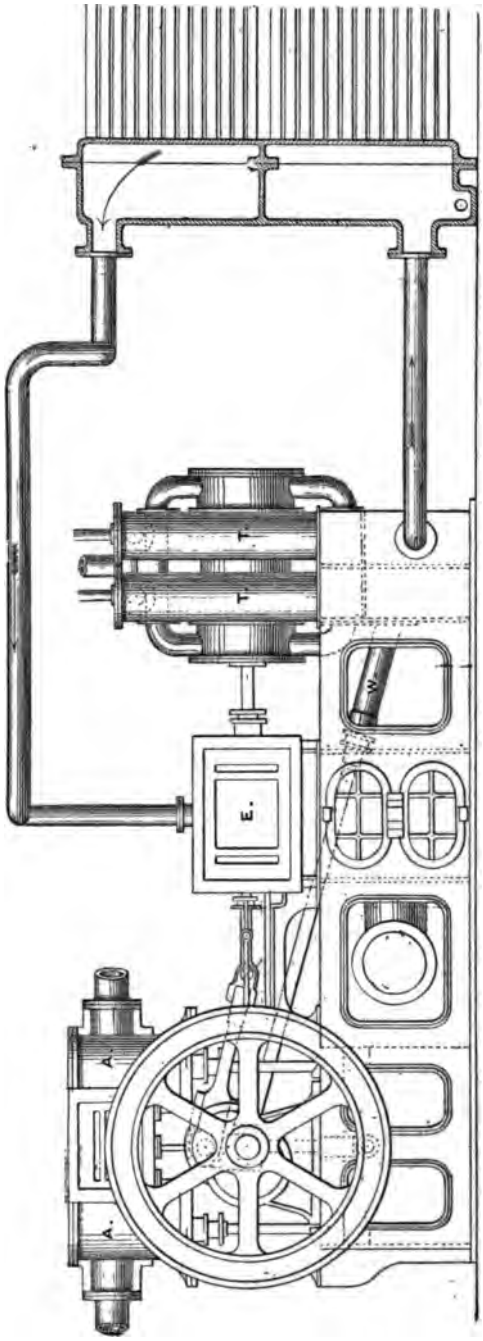
ciales [1], se corrompt très vite, perd en tout cas la majeure partie de son arome, et même un peu de ses qualités nutritives. Ces inconvénients ne se présentent pas, au même degré du moins, pour les viandes conservées dans une atmosphère d'air sec à zéro environ, et constamment renouvelée. Les viandes importées des Etats-Unis supportent dans ces conditions le voyage mieux que celles de l'Australie ou de l'Amérique du Sud, dont la préservation exige un refroidissement plus énergique.

Le système qui consiste à entasser dans le navire les viandes gelées d'avance à — 15° environ présente incontestablement l'avantage d'un tonnage plus élevé conservé avec une dépense de froid moins grande; mais les viandes ainsi traitées, reconnaissables à leur fadeur, n'ont jamais pu se faire admettre, en France du moins, sur un pied comparable à celui des viandes fraîches.

C'est à MM. *Bell* et *Coleman* que l'on doit non pas les premiers appareils — MM. *Mort* [2], *Windhausen-Huch* [3] et *Tellier* [4], les ont précédés dans cette voie — mais les premiers succès, les premières applications véritablement industrielles des machines frigorifiques au transport de la viande par navires. La viande est conservée par une circulation d'air froid sec produit par les machines décrites à la page 27 dans des chambres en bois parfaitement isolées par des parois en sciure et charbon de 0m,30 environ d'épaisseur. L'air est distribué dans ces chambres au moyen de canaux de circulation en bois, pourvus de trappes de répartition et de *snow-box* destinées à recueillir le givre produit par la condensation des vapeurs émises par les viandes. Il faut, pour ne pas augmenter démesurément la dimension des machines, refroidir cette masse d'air par la diffusion de faibles volumes portés à une très basse température, dont la densité facilite d'ailleurs la répartition et la circulation. Les installations maritimes de Bell-Coleman sont très répandues et fort appréciées en Angleterre. Une machine de grande dimension, pouvant refroidir pour le transport une coque à viandes de 1000 tonneaux, revient à 40 francs environ par mètre cube. En quatre années, de 1879 à 1881, les machines Bell-Coleman ont importé d'Amérique en Angleterre 564,000 quartiers de bœuf et 114,000 moutons conservés. Lorsqu'on expose ces viandes brusquement à l'air libre, la vapeur de l'atmosphère s'y condense en une sorte de rosée ; on évite cette humidité en laissant les viandes reprendre peu à peu la température ordinaire dans la cale fermée du navire.

Le type de machines à air adopté par MM. Bell et Coleman pour la conservation des viandes à bord des navires en 1879, aussitôt après le type décrit à la page 27 est représenté par les figures 146 et 147. Les deux compresseurs P. P. de 400 × 400 millimètres sont disposés à la suite de leurs détendeurs E E, de

1. Lafabrègue, brevet anglais 16750 de 1888.
2. Brevet anglais 3223 de 1869.
3. id. 935 de 1869.
4. Péclet, *La Chaleur*, vol. III



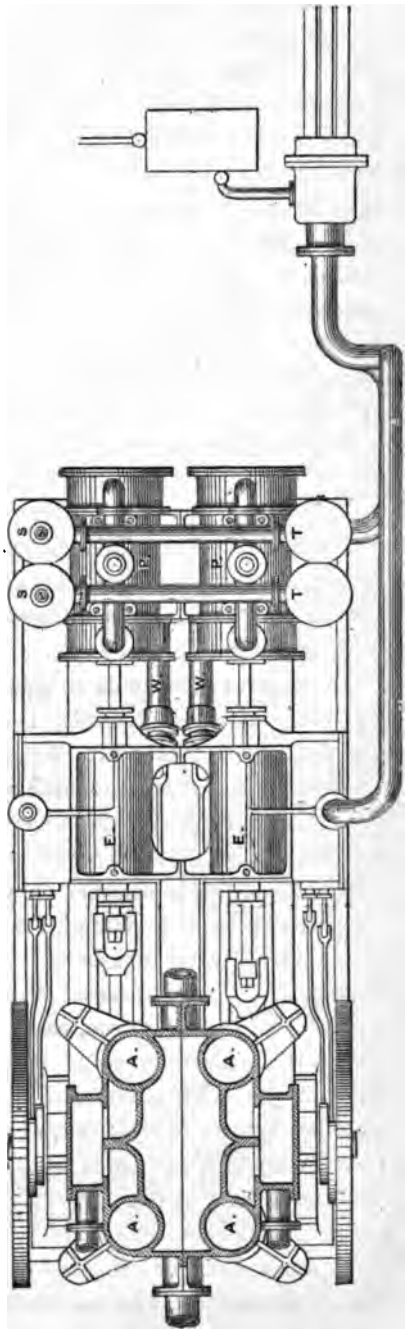


Fig. 146 et 147. — *Bell-Coleman*, Machine de 1879, type marin.
AA cylindres a vapeur jumelés. EE détendeurs. PP compresseurs. (TT ss) tourelles de refroidissement et de séchage de air comprimé.

400 × 400 millimètres de diamètre, actionnés par bielles en retour au moyen de quatre cylindres à vapeur verticaux A A, de 250 millimètres de diamètre et de 400 millimètres de course. L'ensemble, d'une hauteur assez faible pour tenir dans l'entrepont, se compose en réalité de deux machines distinctes, jumelles, et que l'on peut faire fonctionner indépendamment en cas d'avarie, à l'une d'elles. On reconnaît en SS TT les tourelles de saturation et de séchage de l'air comprimé. Une de ces machines fut installée, en 1879, à bord de la *Circacia*, dans une chambre mesurant 540 mètres cubes, et dont les parois étaient soigneusement isolées. Les tubes refroidisseurs-sécheurs enfermés dans cette chambre, étaient disposés exactement dans le sens de la longueur du navire, de manière que leur inclinaison fut aussi peu affectée que possible par la mer. Cette machine pouvait ramener régulièrement de New-York en Angleterre une cargaison de 400 bœufs et d'un grand nombre de moutons, évaluée à 200.000 francs, primitivement gelée à — 40° et emmagasinée dans le navire à cette température. Au mois de juillet, quand la température de la mer était, à New-York, de 30°, et celle de l'atmosphère de 38°, il fallait faire tourner la machine à la vitesse de 100 tours par minute au lieu de 60.

A la suite de cet essai, la compagnie de l'*Anchor Line* prit la résolution de munir de machines frigorifiques à air 30 de ses navires, mais en adoptant, au lieu du type jumelé que nous venons de décrire, le type simple représenté par les figures 148 et 149.

La première machine de ce type fut montée sur le « *Strathleven* » pour un voyage d'essai en Australie. Les compresseurs PP avaient 400 millimètres de diamètre sur 610 millimètres de course, les cylindres à vapeur, A, 250×610 millimètres, et le cylindre détendeur unique, E, 400 × 610 millimètres. On voit en W la pompe d'injection d'eau dans les tourelles S et T. Les tubes refroidisseurs-sécheurs, en fer galvanisé sertis dans leurs plaques tubulaires en fonte, occupaient, le long de la muraille du navire, un volume de 9 mètres cubes, dans une chambre froide de 600 mètres cubes, et couvraient une surface de plancher égale à 2 % environ de celle de la chambre. La salle des machines tenait environ 7 $^1/_2$ % du volume à refroidir. A New-York, avec une température atmosphérique de 40° environ, ces machines abaissaient rapidement au-dessous de zéro des chambres de 18 × 12 × 1^m,80. Leur vitesse moyenne était de 60 tours par minute, avec une compression de 2^k, 8 par centimètre carré. — Elles ont fait, de 1880 à 1882, deux cents traversées, et transporté 27000 tonnes de viandes, d'une valeur de 50.000.000, sans aucun accident, marchant jour et nuit sans arrêts.

La machine du « *Strathleven* » importa d'Australie, en février 1879, 34 tonnes de bœuf et de moutons gelés, en ne marchant qu'une partie de la journée, sur une chambre de 120 mètres cubes. — L'expérience a démontré que l'on pouvait doubler le volume de cette chambre en ayant soin d'augmenter le

parois isolantes d'un remplissage de charbon de 250 milimètres d'épaisseur. Ce fut la première importation pratique des viandes gelées d'Australie. D'après MM. Matthew Taylor Brown, qui fit l'essai de ces machines dans leur voyage d'Australie, la température de l'air au sortir du détendeur, à la pression atmosphérique, avec une compression de 4 atmosphères absolues et de l'eau de refroidissement à 10°, était de — 75°. La température d'un quartier de bœuf pris à 20° degrés et mis dans une chambre froide à —10° tombait, au bout de 5 heures, à 4° à la surface, à 13° à l'intérieur de la viande, et à 10° à 150 millimètres de la surface. En quatre jours, le centre même de la viande tombait à — 1° environ. La traversée d'Australie est d'ailleurs plutôt favorable à cause de la température modérée de la mer depuis Melbourne jusqu'à l'équateur.

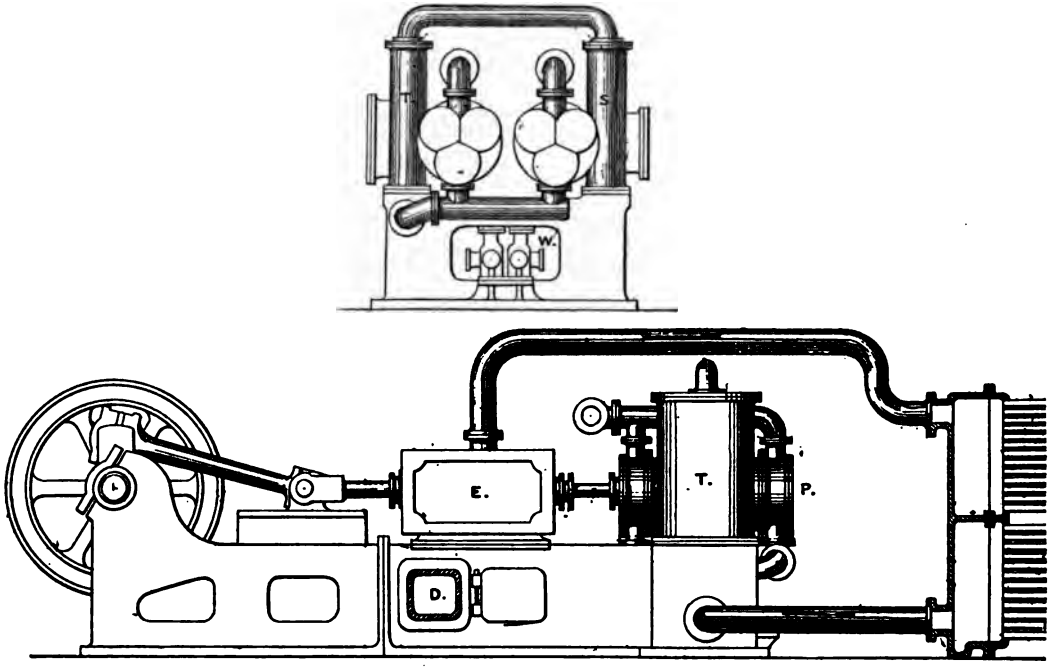


Fig. 148 et 149. — *Bell-Coleman*, Machine de l'« Anchor Line ». PP compresseurs. EE détendeurs. WW pompes d'injection des tourelles S et T. D snow box.

Parmi les machines les plus importantes installées par MM. Bell et Coleman pour le transport des viandes d'Australie, on peut citer celles du « *Poitou* » et du « *Dunédin* », pourvues chacune de deux compresseurs à double effet de 610 × 530 millimètres, débitant 600 litres par tour, ou 2700 mètres cubes par heure à 80 tours par minute. Elles peuvent maintenir à — 30°, sous les tropiques, une cale de 1000 mètres cubes, dont la machine et les tubes sécheurs

occupent environ 75 mètres cubes, et les parois isolantes 225 mètres cubes, ce qui laisse nne chambre utilisable de 700 mètres cubes, pouvant emmagasiner, avec un amménagement soigné, 250 à 300 tonnes de viandes.

Les figures 150 représentent le type de machines proposé par MM. Bell et Coleman pour maintenir au froid les provisions d'office des navires. Le compresseur P, de 350 sur 300 millimètres de course et le détendeur E, de 280 × 300 millimètres, sont horizontaux : les cylindres à vapeur A sont verticaux : Ces machines maintiennent à — 30° leur chambre froide, de 60 mètres cubes, et fournissent la glace nécessaire aux passagers.

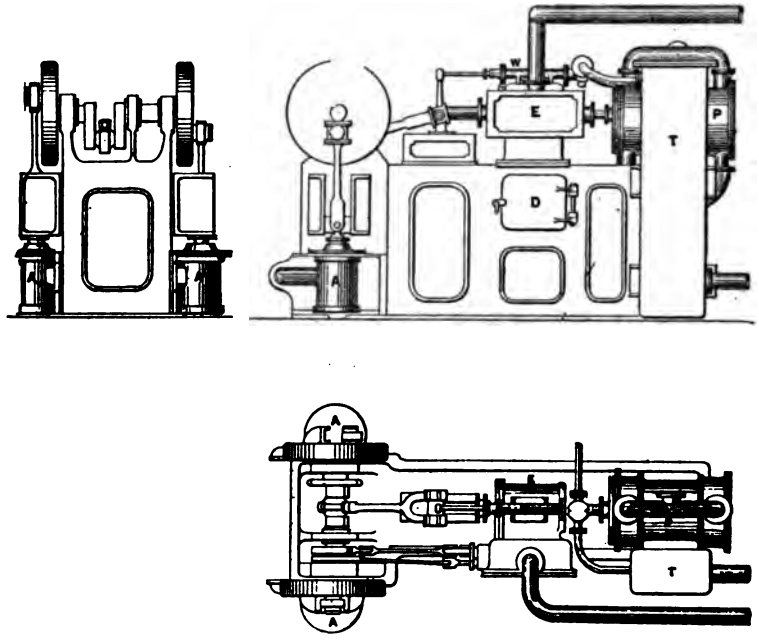


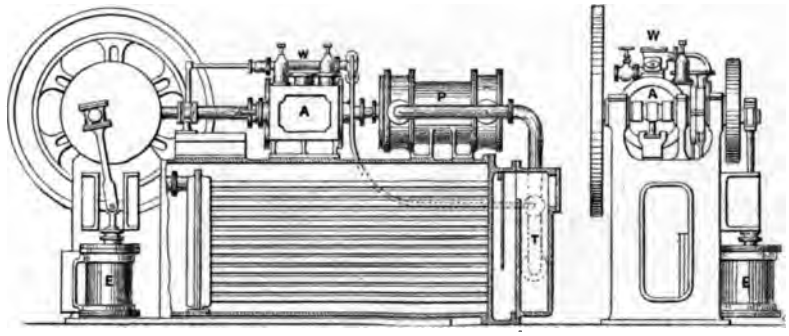
Fig. 150. — *Bell-Coleman. Machine de* 60^{m3} *pour office des navires.*
AA cylindres à vapeur. P compresseur. E détendeur. W pompe d'injection d'eau à la tourelle T. D snow box.

Dans la machine du même genre représentée par les figures 151, 152, 153, le cylindre à vapeur et le compresseur sont horizontaux, en prolongement, et le détendeur est vertical. On obtient ainsi une meilleure distribution des efforts autour de l'arbre moteur, en même temps que l'on peut loger les tubes sécheurs refroidisseurs dans le socle de la machine.

La machine représentée par les figures 155 et 156, également destinée aux approvisionnements des navires, est plus importante que les précédentes. Le compresseur P a 355 × 460 millimètres de course, et le cylindre moteur A

300 × 460 millimètres ; on peut le faire fonctionner avec ou sans condenseur à surfaces C. Il suffit de la faire marcher quelques heures par jour.

Les abattoirs de Sydney sont pourvus d'une machine Bell-Coleman à deux compresseurs, de 610 × 910 millimètres de course, abaissant, à 80 tours par minute, 3600 mètres cubes d'air de 80°, soit une puissance frigorifique de 80.000 calories négatives par heure. Elles refroidissent de 27° à 4° 100 tonnes de viandes par jour.



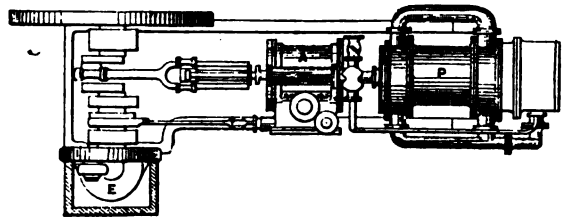


Fig. 151, 152, 153. — *Bell-Coleman. Machine pour office des navires.* A cylindres à vapeur. P compresseur. E détendeur. W pompe d'injection d'eau à la tourelle T.

La figure 156 représente la disposition générale de la chambre froide établie en 1881 par MM. Bell et Coleman pour le chemin de fer de Furness, à Barrow in Furness ; les parois sont en briques, avec bourrage de charbon de bois entre cloisons en planche ; la lumière vient du nord, au travers de verres bleus. Le plancher surélevé repose sur un sol en cendres battues peu conducteur, et que les rats ne peuvent pas traverser. La chambre mesure à l'intérieur $34^m \times 7^m,50 \times 3^m20$ de haut. La machine, du type représenté par la figure 148, maintient facilement à zéro, en été, la chambre pleine de bétail arrivé d'Amérique, et fraîchement abattu aux docks en vertu des polices d'importation.

Parmi les appareils anglais qui ont été, à la suite de ceux de MM. Bell-Coleman, appliqués avec le plus de succès à la conservation des viandes à bord

des navires, je citerai ceux de MM. *Hall* (1), *Hick-Hargreaves* (2) et *Lightfoot* (3). Ce dernier constructeur a récemment installé à bord du navire *Fifeshire* deux machines pouvant refroidir 2300^{mc} d'air par heure à — 50° ou — 60°, suivant la température de l'eau de condensation : ce navire doit rapporter de la Nouvelle-Zélande environ 30000 carcasses ou 900 tonnes de moutons gelés à chaque traversée (4). On estime que la viande reviendra, vendue à Londres, à 0^{fr},50 ou 0^{fr},40 le kilogramme.

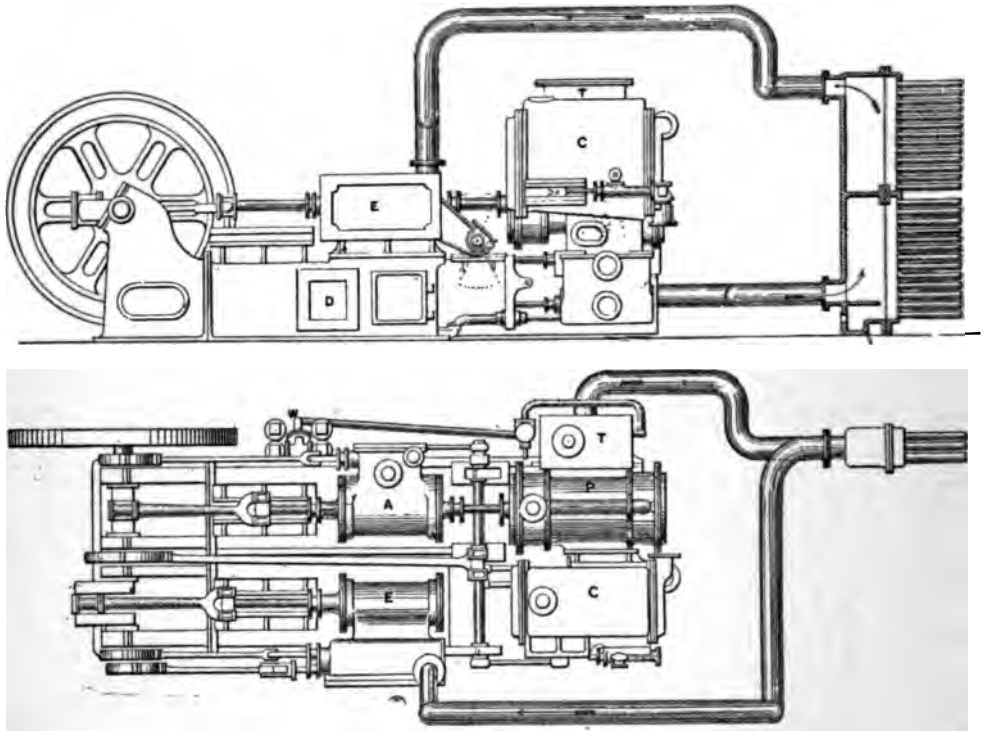


Fig. 154 et 155. — *Bell-Coleman, Machine type marin force moyenne*
A cylindre à vapeur. P compresseur. W pompe d'injection d'eau à la tourelle T. E détendeur. C condenseur à surfaces.

Les *docks de Sainte-Catherine*, à Londres, possèdent un dépôt frigorifique des plus importants pour l'entreposition des viandes importées de l'Australie. Le début de l'installation fut des plus modestes. On installe en 1881, dans un sous-sol voûté de 150 mètres de long, une machine de Hall, pouvant refroidir

1. *Engineering*, 31 mars 1882, p. 305.
2. id. 4 août 1882, p. 113.
3. *Ass. of foremen Engineers*, London, 2 juin, 1888.
4. *The Engineer*, 14 octobre 1887, p. 305.

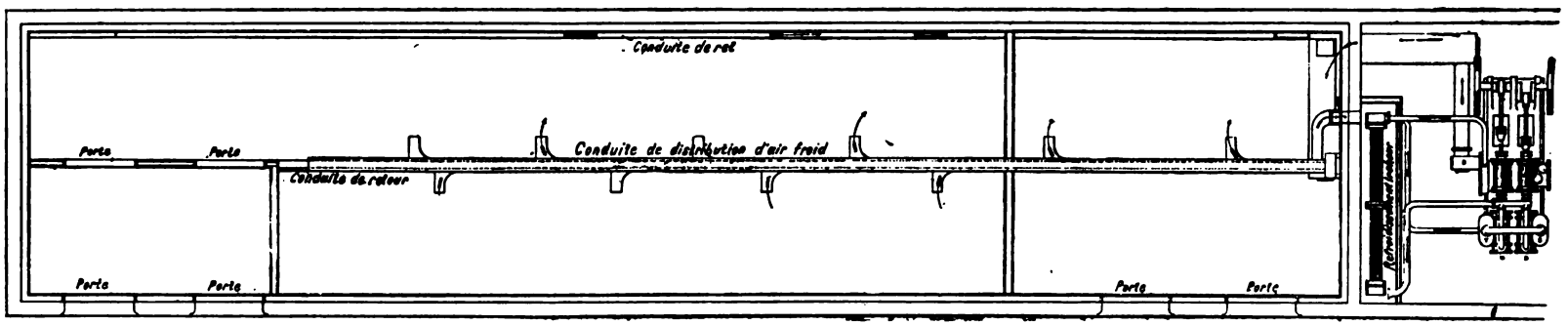


Fig. 156. — *Bell-Coleman*, abattoirs de Furness.

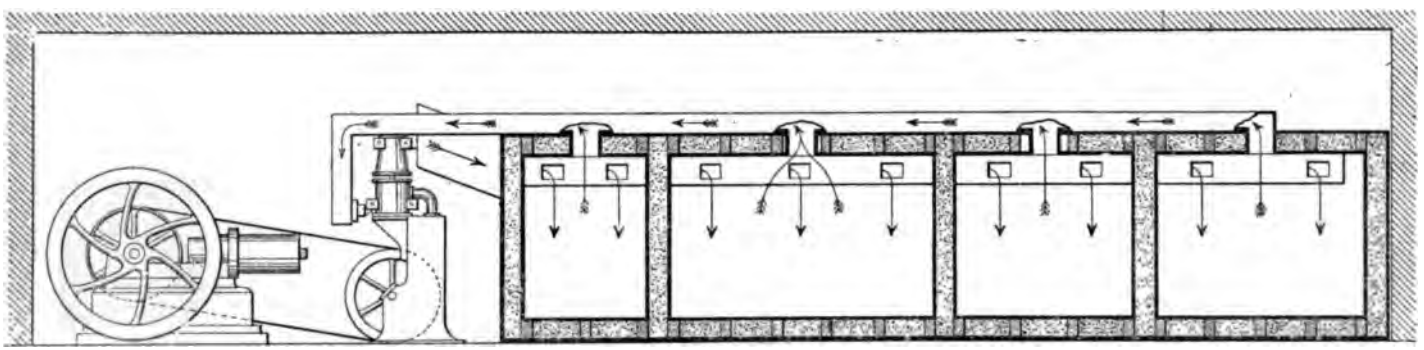


Fig. 157. — *Lightfoot*. Installation de Leaden Hall.

300 mètres cubes d'air par heure, et qui fonctionna jusqu'en 1884 : en 1886, on avait installé 56 chambres froides de 70 à 270 mètres cubes, d'un volume total de plus de 5,550 mètres cubes, pouvant contenir au maximum 56,000 à 59,000 moutons pesant de 30 à 35 kilogrammes : en pratique, en raison des vides indispensables pour le service, la séparation des lots, etc., elles ne renferment, en moyenne, que 44,000 moutons. Les dernières chambres, établies d'après les données de M. Haslam, sont pourvues d'un plancher formé de deux cours de planches l'une, de 30 millimètres d'épaisseur, posée brute sur le béton du sol, l'autre, de 60 millimètres d'épaisseur, soigneusement assemblé et séparée de la premiere par des madriers de 75 × 110 d'épaisseur, espacés de 300 millimètres. — Les parois et le plafond sont construits en madriers de 140×76 millimètres, fermés à l'extérieur par un placage en planches de 50 millimètres d'épaisseur, et à l'intérieur par un double placage de 30 millimètres, garni entre les planches d'un papier goudronné spécial. L'intervalle de 140 millimètres compris entre les placages intérieurs et extérieurs est rempli de charbon de bois en poudre soigneusement pilé et séché — il en est de même pour l'intervalle de 110 millimètres qui sépare les deux planchers. L'air amené des machines par des conduites en bois, entre par le plafond à l'une des extrémités de la chambre, et en sort, à l'extrémité opposée, par un tuyau d'aspiration débouchant aussi au plafond. Il faut enlever la neige de ces conduites toutes les vingt-quatre heures, et celle des *snow-boxes* des machines toutes les quatre heures. — On a eu soin d'éviter les coudes des conduites, et les chambres sont assez bien isolées pour ne s'élever, en cas d'arrêt de la machine, que de 3°,5 en 24 heures, après avoir été remplies de viandes gelées.— La neige retiré des snow-boxes et des conduites sert à refroidir l'eau de condensation des machines.

L'installation comprenant, en mai 1886, quatre machines Haslam de 1,800 mètres cubes à l'heure et trois machines Hall de 900 mètres cubes.

Aux magasins de l'une des jetées : la jetée A, l'une des machines Haslam, de 1,800 mètres cubes, travaille sur 15 chambres, d'une capacité totale de 1,450 mètres cubes, pouvant tenir 11,000 moutons de 35 kilogrammes, mais n'en prenant en moyenne que 8,000 à 9,000. La machine marche 20 heures sur 24, pour permettre le nettoyage des conduites, snow-boxes, clapets etc. La vitesse moyenne est de 80 tours par minute, avec une compression de 3 atmosphères, La température de l'air aux snow-boxes est de — 45°, et l'on maintient celle de salle à — 8° environ. — On obtient ainsi, à égalité de charbon brûlé, plus de froid qu'en marchant à une compression de 3 atm.,50 et avec une température de — 50° aux snow-boxes. — Sur la même jetée, deux machines Hall de 900 mètres cubes refroidissent de même quinze autres chambres. Les trois machines dépensent 4,500 kilogrammes de charbon par 20 heures, soit environ $0^{k}08$ de charbon par mètre cube et par heure.

La jetée B est desservie par deux des machines Haslam de 1,800 mètres cubes, qui travaillent sur 24 chambres d'une capacité totale de 2,700 mètres cubes; elles marchent à 70 tours avec une compression de 4^k800, une température de —45° aux snow-boxes, une consommation de 4,500 kilogrammes de houille par 20 heures, et les mêmes résultats pratiques que les machines de la jetée A.

L'air s'échauffe très vite dans les conduites. On pouvait maintenir les premières chambres auprès des machines froides en ne leur donnant que très peu d'air, presque par le rayonnement seul des conduites, mais il fallait augmenter considérablement les ouvertures de débit et d'aspiration de l'air à mesure que l'on s'éloignait de la machine, jusqu'à la distance extrême de 55 mètres. La température dans les conduites de refoulement d'air froid s'élevait d'environ 0°,10 par mètre.

En pratique, il faut dépenser par heure environ 1^{m3},1/2 d'air à — 45° au sortir des machines pour maintenir à — 8° un mètre cube de viandes à 30 mètres en moyenne des machines, en tenant compte des pertes par les manutentions: dans une chambre constamment fermé, il suffirait d'un mètre cube d'air par mètre cube de viandes.

La figure 157 représente une petite installation frigorifique de M. *Lightfoot*, établi à Leaden Hall Market' pour conserver, en parties gelées et en partie non gelées, environ 20 tonnes de viandes. — La machine frigorifique verticale du type représenté par les figures 59, page 42, est mue par un moteur à gaz Otto, qui ne dépense que 1 fr. 75 de gaz par heure, et ne fonctionne que 3 à 6 heures par jour. La température monte un peu la nuit, et du samedi au lundi, mais jamais assez pour obliger à travailler le dimanche.

Comme nous venons de le voir, à bord des navires, l'air nécessaire à la réfrigération des viandes est produit presque toujours directement par une machine frigorifique à air. On n'a que rarement essayé de produire cet air indirectement par son passage au travers d'un frigorifère actionné par une machine à gaz liquéfié, à ammoniac par exemple : les raisons en sont l'encombrement de ces appareils et leur dépendance d'une provision limitée d'un produit chimique.

Il n'en est pas de même à terre, où ces raisons n'ont, dans les climats tempérés et dans les pays industriels, aucune portée, de sorte que rien n'empêche de profiter autant que possible de l'économie des machines à gaz liquéfiées, aussi bien pour la fabrication de l'air froid que pour celle de la glace. Nous citerons, comme exemple, l'application faite en 1885, à l'entrepôt des Victoria Docks de Londres, d'un frigorifère *Chambers* (*voir* p. 154) capable de refroidir par heure 7200^{mc} à — 18° avec une puissance de 32 chevaux, tandis qu'il aurait fallu environ 90 chevaux pour produire le même résultat avec une machine à air.

Les compresseurs verticaux D.D.DD, (pl. 16) des deux machines à ammo-

niac qui alimentent le frigorifique Chambers aux Victoria-Docks sont à simple effet, à joints d'huile; ils ont 230 millimètres de diamètre, et sont actionnés

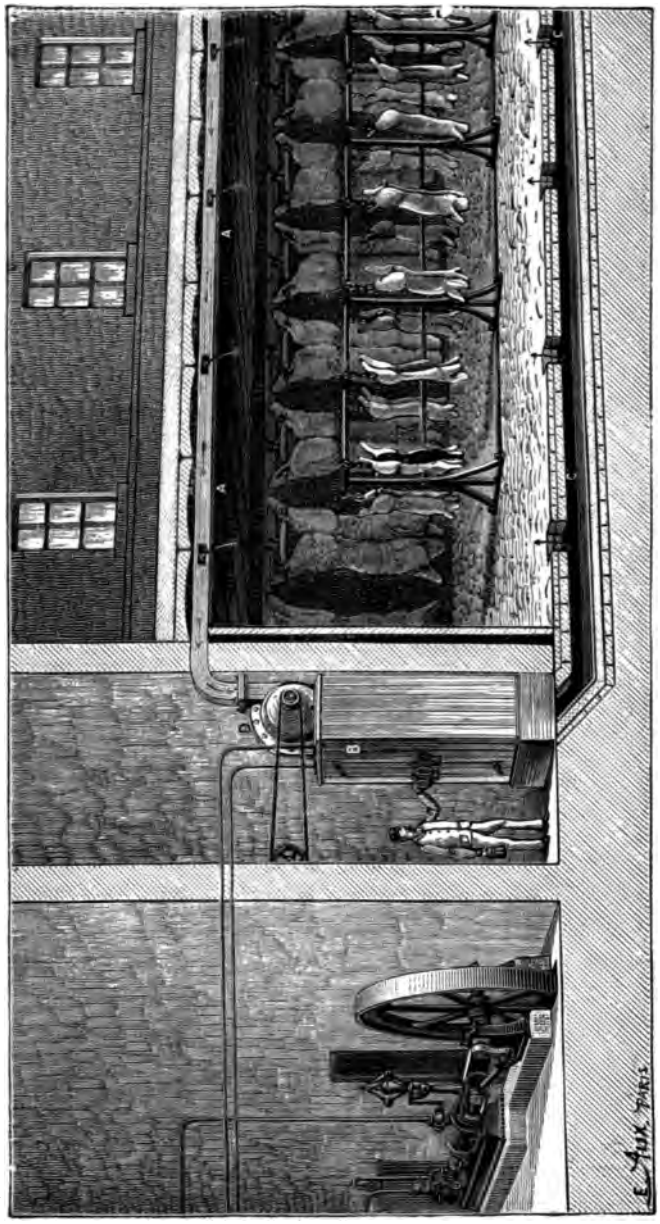


Fig. 158. — *Frigorifère Fixary*

B, frigorifique. A, tuyau d'aspiration. C, refoulement. D, ventilateur.

directement à 100 tours par minute par les manivelles des deux compound verticales E B, à cylindres de 230 et 355 millimètres de diamètre. La puis-

sance de ces machines est, en marche normale, de 32 chevaux. Le condenseur et le réfrigérant sont cylindriques et de mêmes surfaces de serpentins. Le réfrigérant refroidit une dissolution de chlorure de magnésium que l'on fait circuler autour des tubes du frigorifère.

Ce frigorifique est divisé en quatre compartiments renfermant en tout 900 tubes en U, en cuivre, de 25 millimètres de diamètre intérieur et de 3 mètres de long en moyenne (217 mètres carrés de surface) traversés par l'air de la chambre à refroidir, et entourés par une circulation du liquide incongelable du réfrigérant, comme nous l'avons expliqué, p. 154. On débite ainsi par heure en marche normale 7,200 mètres cubes d'air à —18° au sortir du frigorifère ; l'air de la chambre froide toujours le même étant maintenu à 6°, on peut compter sur une dépense de 23,000 calories négatifs par heure : ou de 720 calories par cheval-heure indiqué.

Les appareils *Fixary*, qui produisent aussi (p. 155), mais d'une manière différente, l'air froid sec et renouvelable à volonté par le jeu d'un frigorifère à gaz liquéfiés, sont actuellement l'objet d'applications importantes aux maisons de préservation de Lisbonne, de Crefeld, et aux halles de Bruxelles.

Un conduit d'aspiration A(fig. 158), placé dans le haut de la salle, aspire l'air à refroidir. Cet air, à son passage dans le frigorifère B, s'y sèche, s'y purifie, et est refoulé dans la salle, refroidi à plusieurs degrés au-dessous de zéro, par le conduit C. En raison de sa densité, l'air froid ne monte qu'au fur et à mesure que l'aspiration supérieure produit un vide partiel, et détermine par conséquent un tirage naturel, lequel finit par établir dans toute la salle l'équilibre de température. Une déviation spéciale de la conduite d'aspiration permet au ventilateur D d'aspirer de l'air en dehors de la salle, pour renouveler au besoin l'air du local.

La *Société des Constructions mécaniques spéciales* avait exposé dans l'emplacement réservé au Ministère de la Guerre, sur l'Esplanade des Invalides, un pavillon frigorifique pourvu d'un frigorifère Fixary de 5000 calories à l'heure dont l'ensemble est représenté par les figures 158-160 et par la planche 15. La machine frigorifique, à deux cylindre à simple effet 130 × 300 millimètres, du type décrit à la page 102, marchant à 85 tours par minute. Le frigorifère, à trois serpentins de tubes de 27 × 34 millimètres, présentait une surface réfrigérante totale de 25^{mc}. La salle de conservation avait une capacité de 50^{mc}.

La Chambre Syndicale de la Boucherie de Paris exécuta avec ce frigorifique, pendant trois mois des expériences de conservation des viandes dont nous empruntions les principaux détails au rapport du président de la Chambre Syndicale, M. Lioré.

Le point capital, sur lequel nous avons concentré nos expériences, a été, nous le répétons, pour dissiper toute équivoque, la conservation de la viande, à l'état frais, sans aucune congélation.

Sur ma proposition, la Chambre syndicale de la Boucherie de Paris et du département de la Seine, décida de faire des expériences pour rechercher le meilleur procédé de conservation des viandes par le froid, sans les geler. Une commission fut nommée pour déterminer les meilleurs conditions dans lesquelles devaient être faites ces expériences, et contrôler les résultats. MM. Lioré, Yvon, Bezançon, Petit et Bary furent chargés de cette mission.

Voici le compte-rendu des travaux de cette commission et les résultats de ces opérations, consignés jour par jour.

Mercredi 24 juillet 1889. — On achète la viande nécessaire pour les expériences, qui ont été faites dans la chambre froide, système Fixary, installée à l'Esplanade des Invalides pendant la durée de l'Expositon universelle, par la Société des constructions mécaniques spéciales, rue Lecourbe, 242. Il y avait un quartier de derrière de bœuf, 4 moutons et une fressure. Le poids de ces quatre moutons était de 104 kilos. Le quartier du derrière de bœuf pesait 84 kilos. Cette viande provenait d'animaux abattus le même jour à neuf heures du matin. Chargée sur une voiture à deux heures de l'après-midi, cette viande quittait l'abattoir de la Villette et arrivait à trois heures à l'Esplanade des Invalides.

Une demi-heure après, elle était installée dans la chambre froide. L'expérience commençait.

Pour bien déterminer les conditions les plus favorables à la conservation des viandes, chaque mouton fut placé dans des conditions spéciales.

Un mouton fut disposé dans cette chambre sans avoir été dégraissé ni écasillé. Il pesait 26 kil. 250; c'était le plus lourd.

Le second mouton, qui pesait 25 kilos, fut dégraissé : il était d'ailleurs un peu gras.

Le troisième mouton, également gras, moins lourd, fut également dégraissé. Son poids était de 23 kil. 250.

On écasilla le quatrième mouton qui, d'aussi bonne qualité que les précédents, leur était inférieur comme état de graisse. Il ne pesait que 21 kilos.

Pour éviter toute confusion, chacun de ces moutons fut pourvu d'une marque spéciale, soit au gigot, soit à l'épaule.

Quant au quartier de derrière de bœuf, qui pesait 84 kil. 200, il fut également dégraissé, et la bavette détachée.

Lundi 19 août. — Le thermomètre remonte à + 25°, la température devient très orageuse et exerce une influence des plus défavorables pour la conservation de la viande dans les étaux. Cette influence ne se fait nullement sentir dans l'intérieur de l'entrepôt et les viandes ne s'en ressentent pas.

Vendredi 23 août. — Température bonne, fraiche, favorable à la conservation de la viande. A midi, le thermomètre ne marque plus que + 18°.

Le quartier de bœuf, dont la couverture a conservé toute sa blancheur, est dans un parfait état de sécheresse.

La graisse elle-même commence à se dessécher et ne dégage aucune mauvaise odeur. Sur les deux autres moutons qui n'ont pas été dégraissés et que la Commission a décidé de couper en morceaux pour constater leur état de conservation, nous remarquons, qu'à part le dessous des hampes qui, fatalement, ne pouvait pas se conserver longtemps, toutes les autres parties s'étaient convenablement ressuyées et desséchées.

Le mouton qui n'était pas écasillé était dans un parfait état de conservation. Quant à l'autre, le quasi des gigots avait noirci.

Sur le gros mouton, nous relevons une perte de poids de 2 kil. 550 gr. A l'entrée dans la chambre frigorifique, il pesait 26 kil. 230 et ce jour son poids n'atteignait plus que 23 kil. 700, soit une perte de 9.70 p. 100.

Le petit mouton, au contraire, avait éprouvé une perte de 2 kil. 600. De 21 kilos, poids initial de l'expérience, nous descendons à 18 kil. 400, soit une perte de 12.48 p. 100.

Ce petit mouton a donc proportionnellement perdu beaucoup plus de poids que le gros, puisque plus petit, il perd 50 grammes en plus, et qu'il pesait 6 kilos de moins au début de l'expérience. Cet écart appréciable provient de ce qu'il a été écasillé, et a ainsi fourni une plus grande surface d'évaporation. Il a séché davantage. Aussi pouvons nous dès maintenant établir, en thèse gé-

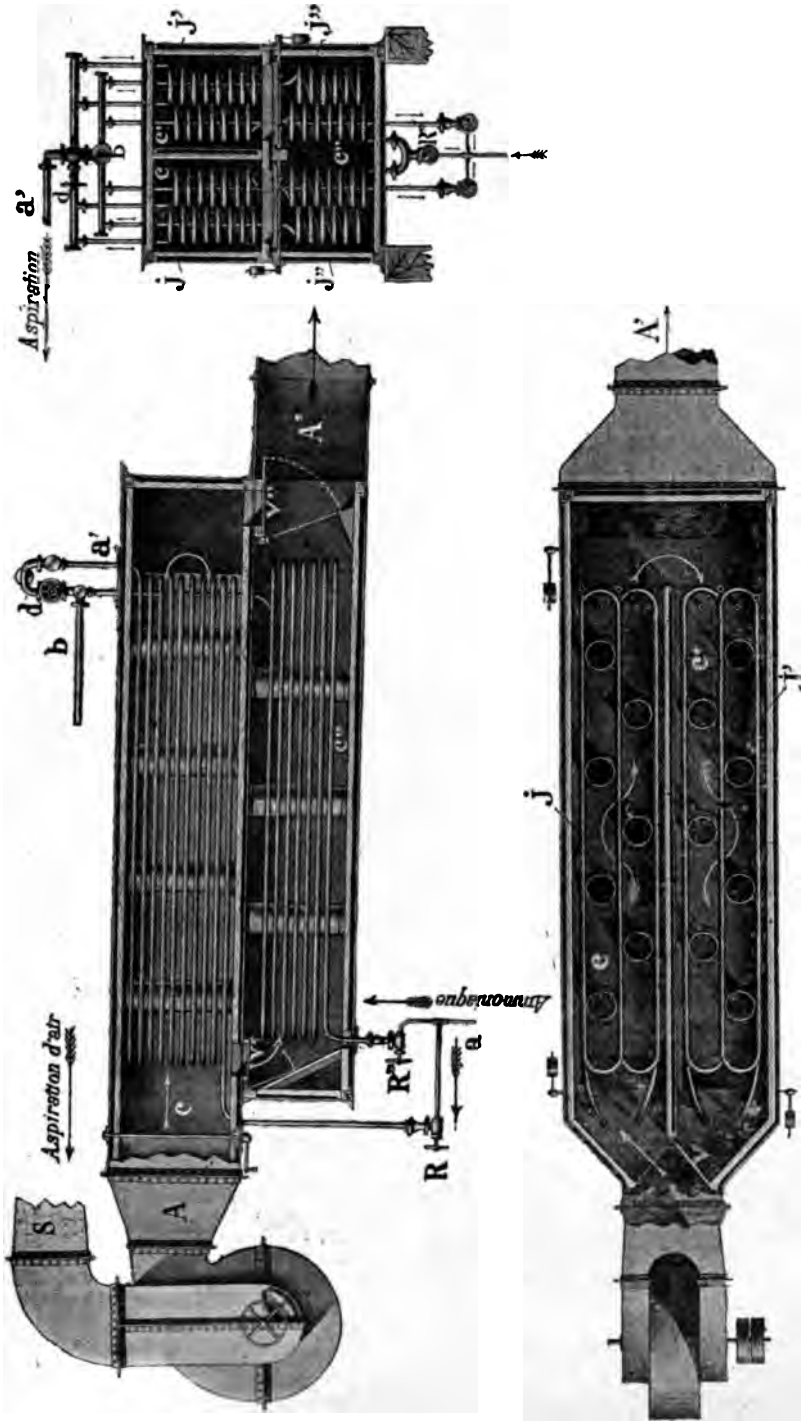


Fig. 159. — *Frigorifère Fixary à trois compartiments.* Coupe longitudinale. Plan et coupe transversale.

S, aspiration de l'air de la chambre froide. AA', refoulement de l'air dans la chambre froide au travers du frigorifère suivant les compartiments *c* et *c''* ou suivant *c'* et *c''* selon la position de la vanne directrice V. J J' J'', serpentins des compartiments *c c' c''*. V', vanne de séparation du compartiment *c''*. V'', vanne régulatrice du débit d'air froid.

a, tuyau amenant l'ammoniac liquide aux robinets détenteurs R R' R'' des serpentins, J J' J'' d'où il revient à l'aspiration du compresseur par le tuyau *a'*.

b, tuyau de dégivrement auxiliaire, permettant de refouler directement et sans détente l'ammoniac chaud du compresseur aux serpentins du frigorifère, en ouvrant le robinet *d*.

nérale, que les gros moutons perdront toujours moins de poids que les petits, et que cette perte s'effectuera en raison directe de la surface d'évaporation. On aura donc tout intérêt à maintenir les animaux entiers, sans les écasiller.

Ce même jour, on a donc fendu ces deux moutons et on les a coupés en morceaux.

Le gros mouton avait très belle apparence. Ces gigots, qui n'avaient pas été écasillés, présentaient à la coupe un aspect remarquable de fraicheur. Toutes les parties étaient belles, en parfait état de conservation, à part, toutefois, le dessous de la hampe, qui, comme nous l'avons déjà dit, avait pris une teinte jaunâtre.

Les rognons retirés de leur enveloppe de graisse avaient conservé leur état de fraicheur; on pouvait facilement les admettre comme provenant d'un mouton ayant au plus deux jours de tuerie.

Nous constatons également sous la graisse des rognons la présence d'une fraicheur du meilleur aloi, qui avait maintenu les filets dans un état parfait de conservation. Le seul défaut que nous ayons enregistré consiste dans la teinte noirâtre qu'avaient prise la peau du filet et la poitrine du mouton : et encore ce défaut n'était pas très sérieux, puisqu'il n'avait pas enlevé aux parties indiquées leur valeur commerciale.

En résumé, les morceaux de ce mouton débité conformément aux usages de la boucherie ne différaient en rien de ceux des moutons qu'en hiver, avec une température de + 4 à + 8 degrés, nous débitons après cinq à six jours de tuerie. Le boucher le plus expérimenté n'eut pu assigner à ce mouton une telle durée de conservation, et *nous ne pensons pas qu'il eût attribué plus de huit jours de tuerie à ce mouton, qui avait été cependant conservé depuis un mois.*

Le petit mouton, qui avait été écasillé, ne se présentait pas sous un aspect tout à fait aussi favorable. Tout le pourtour des gigots et du quasi était desséché et avait revêtu une teinte foncée, noirâtre. On eût dit un mouton ayant huit jours environ de tuerie pendant la saison d'hiver, abstraction faite des gigots et du quasi. Le reste du mouton s'était comporté dans les mêmes conditions que les précédents.

Lorsque les carrés furent parés, on eut pu les comparer avec des carrés frais. C'était à s'y méprendre.

Les épaules avaient pris une teinte foncée et la graisse apparaissait avec une couleur bise.

Un gigot fut désossé, l'intérieur était en parfait état de conservation.

J'ai détaillé des côtelettes et une épaule, et personne n'a soupçonné que cette viande avait été conservée aussi longtemps.

Pour accentuer l'expérience, j'ai tenu accrochés dans l'étal, pendant vingt-quatre heures, un quartier du gros mouton, un carré et une épaule. Rien ne fut abimé; quelques parties s'étaient desséchées un peu, avaient revêtu une teinte plus foncée, mais il n'y a là rien d'anormal, puisque, par la température chaude, la viande fraiche, coupée la veille, noircit toujours un peu au bout de quelques heures .....

Lundi 2 septembre. — A huit heures et demie du matin, M. Lioré se rend à l'Esplanade des Invalides pour retirer le morceau d'aloyau qui doit composer le rôti du diner de la Commission. *Il constate que les deux coupes qui avaient été pratiquées, au lieu d'être foncées, avaient pris une teinte rosée de viande fraiche.*

Le quartier de bœuf et les moutons étaient toujours dans le même état, mais avec une apparence moins belle.

M. Lioré, ayant apporté chez lui le morceau d'aloyau, l'examina minutieusement. De la partie supérieure de la couverture, se dégageait une légère odeur qui aurait passé inaperçue auprès d'une personne non initiée aux habitudes, aux connaissances de la profession. L'échine, au contraire, exhalait une odeur comparable à celle d'une viande qui aurait longtemps séjourné dans un endroit clos. Ce n'était pas une odeur de moisi, mais bien une odeur de renfermé : ce terme qualifie mieux ma pensée, l'impression que j'ai ressentie: en un mot, l'odeur d'une pièce qui n'a pas été ventilée depuis longtemps.

Dans la bavette. l'humidité avait gagné la viande sur une étendue de deux à trois centimètres. Pour rendre cette partie commerciale, il a donc fallu rafraîchir la première coupe de l'aloyau sur une étendue de 3 à 4 centimètres.

M. Lioré coupa donc un morceau de 3 kilos environ qui fut réservé pour le rôti, et un morceau de bavette de 1 kil. 970 pour le pot-au-feu. L bifteck pesait environ 650 grammes.

Le restant de l'aloyau fut désossé, débité à mon étal et vendu comme des faux-filets à des clients qui ne me présentèrent jamais aucune observation sur la qualité de la viande qui leur avait été livrée. D'ailleurs, *un boucher même aurait pu s'y méprendre, et considérer cette viande comme n'ayant que quelques jours de tuerie seulement.*

Pour être bien édifié sur la situation de cette viande, je me rendis chez M. Labour, un confrère des plus compétents, et lui demandai de vouloir bien me donner son appréciation sur la qualité de la viande et sur le nombre de jours de tuerie qu'elle pouvait avoir. Je lui présentai un morceau de faux-filet de 2 kil. 500 environ, qu'il examina dans tous les sens.

Voilà quelle fut sa réponse :

« C'est de la bonne viande que l'on peut donner à tout le monde, sans crainte « de reproches. Elle a environ de deux à trois jours de tuerie. Cependant, si « elle a été conservée dans un timbre-glacière quelconque, elle peut avoir « deux à trois jours de tuerie de plus. Elle est ferme et belle. »

On comprendra la surprise de M. Labour, lorsque je lui fis connaître que *cette viande avait 43 jours de conserve.*

Le soir assistèrent au banquet de dégustation :

MM. Bary, Bezançon et moi, tous trois représentant le commerce de la boucherie.

MM. de Stoppany et Mille, ingénieurs, de la Société des constructions mécaniques.

MM. Biard et Lioré, cuisiniers.

Le morceau de bavette de 1 kil. 970 avait été mis dans le pot-au-feu à une heure et demie de l'après-midi. La cuisson fut continuée jusqu'à 7 heures du soir. Nous pouvons déclarer hautement que le bouillon était parfait, exquis, sans aucun mauvais goût. Personnellement, je n'aurais pas pensé obtenir un pareil bouillon avec cette viande, et, si le pot-au-feu n'avait pas été préparé chez moi, je n'aurai pas cru au succès de cette expérience.

Le bœuf bouilli était très comestible. Deux des convives attribuèrent un léger mauvais goût au gras : je ne m'étonnais pas du fait, car le gras incriminé était à proximité de la coupe que j'avais dû rafraîchir. Les autres convives se déclarèrent satisfaits de la qualité et du goût de la viande qui leur avait été servie. Elle ne provenait pas, en effet, du même endroit. Les deux convives qui s'étaient plaints du gras de la coupe, furent invités à goûter du gras pris sur un autre point de la bavette. Après dégustation, ils le reconnurent bon, parfait, d'une saveur agréable. L'expérience était concluante.

Je fis servir en même temps sur la table deux biftecks de provenance différente. L'un avait été coupé sur le quartier de derrière conservé depuis 43 jours, tandis que l'autre avait été pris sur un des bœufs exposés dans mon étal. Tous deux furent cuits côte à côte dans la même poêle.

On les apporta ensemble sur la table, et là je les coupai séparément. La coupe resta la même, c'est-à-dire bien rosée pour chacun d'eux ; *il eut été à ce moment impossible de les différencier.* Le boucher le plus expérimenté, le plus habile cuisinier, le plus fin gourmet n'auraient pu se prononcer hardiment et sûrement sur la provenance de chacun, tellement la ressemblance était frappante.

Seule, *la mache* a pu permettre à mes convives de se prononcer en connaissance de cause, et encore cette distinction reposait non pas sur les conséquences de la conservation, mais bien sur la différence de qualité de la viande : en effet, le bifteck provenant de mon étal, était de qualité supérieure.

Le bifteck de conserve parût de sa nature plus sec, et surtout moins moelleux ; il ne pouvait donc supporter la comparaison avec le bifteck frais qui était plus gras, plus mûr et surtout plus fin.

L'aloyau avait un défaut, celui d'être trop cuit, et cependant tous mes con-

vives le déclarèrent excellent. *Il présenta la teinte rosée, particulière aux viandes fraiches.* On dégusta successivement le faux-filet, puis le filet: le tout fut reconnu très bon. Mais le gras du faux-filet qui se trouve à la jonction de la bavette présentait un léger goût ; quiqu'il en soit, l'ensemble de l'aloyau était bon, et personne n'eut pu attester, sans être prévenu, que cet aloyau avait été conservé si longtemps.

C'est donc pour nous un fait bien acquis, et nous pouvons l'affirmer hautement, *qu'il est possible de conserver la viande à l'état frais dans des entrepôts dont la température sera maintenue entre + 1° et + 4°, à la condition toutefois de la préserver contre toute humidité.*

Pendant une période de 30 à 40 jours, la viande conserve non seulement ses propriétés comestibles, mais aussi sa qualité commerciale. Lorsqu'elle est rafraichie, puis coupée en morceaux, personne ne peut évaluer la durée de la conservation de cette viande, *puisqu'elle présente tous les signes de la viande fraiche.*

Le lundi, cette viande a été retirée de l'entrepôt par un temps lourd, orageux. Le thermomètre marquait de + 26 à + 20°. L'aloyau est resté en contact avec l'air ambiant de 8 heures du matin à 6 heures du soir, sans éprouver aucun changement de couleur.....

Le mouton fut fendu, puis découpe selon les habitudes de la boucherie.

L'intérieur était très noir, mais les nouvelles coupes présentèrent une apparence de fraicheur en tout semblable à celle constatée sur les moutons frais. Les poitrines trop desséchées ne purent être livrées à la consommation; mais il n'en fut pas de même des épaules, des côtelettes et des gigots qui, ayant conservé leurs qualités comestibles, furent, avec avantage, utilisés pour la consommation. J'ai mangé une côtelette et je déclare qu'elle me parût juteuse, aussi bonne que n'importe quelle autre côtelette provenant d'un mouton frais: à plus forte raison, sans être prévenu, on n'eut pu en faire la différence. Le mouton qui pesait au début 21 kil. ne pesait plus en sortant de l'entrepôt que 18 kil. 40: soit une perte de 2 kil. 60 ou de 12,38 0/0 après 52 jours de conservation.

M. de Stoppani, ingénieur de la Société des constructions mécaniques, exprime le désir de connaitre comment pourrait se comporter en voyage un mouton retiré de la chambre frigorifique. Après une journée passée en chemin de fer: ce mouton, pourra-t-il se maintenir dans son état de conservation ? Il y avait là une inconnue à dégager. C'était une grave question. Le succès ou l'insuccès de cette expérience devait faire triompher ou anéantir nos expériences basées sur le maintien de la conservation de la viande à l'état frais. Je m'engageai donc à faire l'expérience et pour donner plus de poids, plus d'autorité au résultat de cette expérience, il fut décidé que j'effectuerai le parcours entier du chemin de fer de grande ceinture après avoir fait enregistrer ce mouton aux bagages.

Lundi 16 septembre. — Le mouton est enveloppé de linge, entouré de paille fraiche, puis placé dans un panier dont la partie supérieure est fermée par une toile d'emballage, comme cela se pratique dans les envois de viandes aux Halles centrales.

A six heures et demie du matin, accompagné de ce colis, je me fais conduire à la gare de l'Est. Je prends un billet pour Noisy-le-Sec ; mon mouton est placé aux bagages. Arrivé à huit heures à Noisy, je reprends le train de grand ceinture qui doit me conduire à Juvisy en passant par Saint-Denis, Saint-Germain et Versailles. A midi, j'arrive à Juvisy, où je déjeune après avoir laissé mon colis à la consigne. A trois heures et quart, je quitte Juvisy, à destination de Paris, je retire mon mouton des bagages, et je le fais transporter chez moi, 91, rue de la Boétie, où j'arrive à 5 heures et demie.

Le mouton a donc voyagé, étant emballé, pendant douze heures.

Nous avons été favorisé par la température qui, ce jour-là, s'est maintenue favorable à la conservation de la viande, pendant toute la durée de l'expérience. Le thermomètre qui ne marquait que + 5° à sept heures dn matin n'a pas dépassé + 15° dans le cours de la journée.

A six heures du soir, je fis fendre ce mouton. Une moitié fut conservée intacte, l'autre moitié fut partagée en deux morceaux. La moitié intacte resta

suspendue à l'étal, tandis que les deux autres morceaux furent déposés dans le timbre glacière, système Goodell.

La température de la nuit fut favorable, et la viande se maintint en parfait état, aussi bien dans l'étal que dans le timbre.

Mardi 17 septembre. — Dès le matin, je découpe en morceaux ce mouton fendu la veille. Les coupes avaient très belle apparence, preuve indéniable de la parfaite conservation, tandis que toute la surface de la viande était desséchée, raccornie même, en un mot, avait perdu son aspect commercial. Je coupais la selle des gigots et la préparais en côtelettes. Elles furent vendues et acceptées comme telles par mes clients. Personne ne le remarqua, et je ne reçus aucun reproche.

Les gigots furent envoyées chez un gérant des grands Bouillons de Paris et consommés dans ces Bouillons. Il m'aurait été difficile de les vendre entiers à mes clients, en raison précisément de l'état de sécheresse et de la couleur foncée de la couche superficielle de ces gigots. En les adressant à ce gérant, je m'assurais ainsi que cette viande n'avait pas perdu son goût, et qu'elle était acceptée sans repugnance par le consommateur non prévenu.

Je débitais à ma clientèle les côtelettes. Les trois premières découvertes durent être épluchées avec soin : j'enlevais l'os de l'échine sur presque toute sa longueur. Un commencement de détérioration s'était manifesté sur la partie de la viande qui couvre l'échine des côtes découvertes dans l'intérieur du mouton.

Le collet débarrassé de la saignée était bien vendable.

Mais je ne pus tirer aucun parti des poitrines et de la peau du filet de mouton, en raison de leur état de sécheresse.

Pour constater la déperdition résultant de la longue durée de conservation, je l'avais pesé avant de le découper. Au lieu de 23 k. 250, poids constaté à son entrée dans la chambre froide, il ne pesait plus que 19 k. 650, soit une perte de 3 k. 600. Ce mouton a donc perdu 15,05 0/0 de son poids total pendant les cinquante-six jours de conservation.

En présence de ces expériences, *nous pouvons donc affirmer que l'on peut conserver un mouton pendant une durée de 30 à 40 jours à la température de +1 à + 4°*. Pour assurer le succès de cette conservation, il faudra remplir les conditions suivantes :

1° *Ne pas l'écasiller.*
2° *Ne pas le dégraisser,*
3° *Eviter qu'il soit mouillé,*
4° *Enlever la hampe et l'onglet.*

Du lundi 16 au vendredi 31 septembre, la température se maintient fraiche, presque froide, le thermomètre variant à sept heures du matin entre + 4 et + 6° et dans l'après-midi entre + 15 et + 18°.

Jeudi 20 septembre. — On coupe sur la cuisse un morceau de rumsteck de 5 kilos environ.

M. Richard, ingénieur directeur de la Société des constructions mécaniques spéciales, accompagné de M. Hirsch, ingénieur, membre de la Commission d'études des procédés de conservation des viandes par le froid, au ministère de la Guerre, ont fait couper sur la cuisse un morceau de rumsteck d'environ 5 kilogrammes qu'ils ont fait cuire. Nous renvoyons nos lecteurs à la lettre ci-contre, qui résume leurs impressions.

« Monsieur Lioré,
Président de la Chambre syndicale de la Boucherie de Paris,

« En réponse à votre lettre honorée datée du 26 courant, je m'empresse de vous confirmer les résultats de l'expérience de dégustation que nous avons faite, de concert avec M. Richard, le 20 septembre dernier.

« Un morceau de viande a été, sous nos yeux, détaché d'une cuisse de bœuf pendu dans la chambre frigorifique installée à l'Esplanade des Invalides, ce morceau a été immédiatement cuit, mangé par nous, et le goût en a été trouvé parfait ; la viande était succulente, et ne présentait au goût aucune différence avec la viande fraiche; en un point seulement, d'étendue très restreinte, dans

la partie adhérente à l'enveloppe graisseuse du muscle, on a trouvé un goût très léger de faisandé.

« Je vous prie d'agréer, mon cher collègue, l'expression de mes sentiments les plus distingués.

J. Hirsch. »

Au fur et à mesure que nous avons prélevé des coupes sur ce quartier, nous avons remarqué que la section était très belle, d'un rose normal, puis que, peu à peu, cette couleur fonçait, noircissait, mais à la superficie seulement, *sans jamais pénétrer à l'intérieur de la viande.* .....

Lundi 7 octobre. — A six heures et demie du matin, je fis transporter la cuisse chez un de nos confrères, rue Saint-Dominique. Je la fis séparer, mais ce travail s'effectua avec une certaine difficulté, à cause de la contraction, du desséchement des fibres de la viande.

La déjointure de la jambe avait une couleur belle, franche, normale.

Le tende de tranche, la tranche grasse et la semelle ne laissaient rien à désirer sous le rapport de la couleur, de l'aspect. *Il eût été impossible de se prononcer sur la durée de conservation de cette viande qui ne différait en rien comme aspect de celle qui, pendant l'hiver, reste plusieurs jours exposée dans nos étaux.*

Le dessous, c'est-à-dire la graisse qui recouvre la cuisse paraissait un peu rance, et les fibres qui s'y trouvent disséminées étaient recouvertes de moisissures sèches, mais ne laissant échapper aucune odeur.

Une particularité remarquable, c'est que la graisse seule présentait cette altération, tandis que la viande avait conservé une très belle couleur.

La gite à la noix a été divisé en deux parties, dont une a été vendue dans mon étal, et personne ne m'a adressé la moindre observation. D'ailleurs, la coupe était si belle que le client le plus difficile eut été satisfait et l'eut acceptée sans hésitation. Le seul défaut qu'on peut lui reprocher, c'était la teinte un peu grisâtre de la couverture.

La tende de tranche a été également séparée en deux parties. Sur l'une d'elles je prélevai un morceau d'une livre et demie. Lorsque la graisse fut enlevée, il parut en tout semblable à tel ou tel morceau que nous conservons une huitaine pendant l'hiver.

Cette tranche a été présentée à l'examen d'une Commission municipale chargée d'inspecter les divers systèmes de conservation des viandes par le froid. Les membres de cette Commission ont dégusté cette tranche préparée à la manière d'un rumsteck et ont déclaré qu'elle n'avait aucun goût, mais qu'elle n'était pas suffisamment tendre. Nous avions prévu cette objection, en leur déclarant, avant la dégustation, que le morceau qui leur était soumis rôti n'était généralement employé que pour la confection du pot-au-feu. D'ailleurs, M. Deligny, conseiller municipal, président de la Commission de ravitaillement, s'exprimait ainsi, dans un interview publié par le journal l'*Eclair :* « Lors de sa visite à ces différents appareils, exposés tant aux Invalides qu'au Champ de Mars, la Commission a fait couper sur un des morceaux exposés, une large tranche de bœuf qui, après la préparation culinaire indispensable, a été trouvée *dans un état parfait de conservation.*

Le même jour, trois commissions sont venues visiter cette viande et en ont constaté la belle apparence.

La crosse, cassée en morceau, était un peu bleuâtre à l'intérieur, mais s'était convenablement desséchée et n'exhalait aucune odeur.

La tranche a été conservée coupée en morceaux jusqu'au jeudi suivant, 10 octobre. .....

Résumé des expériences.

Le bœuf est donc conservé pendant un mois sans subir d'autres pertes que celles de poids résultant de la dessication. On peut l'évaluer à 5 ou 6 0/0 au plus. Après une période de six semaines, il a subi un nouveau déchet par suite du rafraichissement des coupes et des parties superficielles. La perte

provenant de ce chef, ajoutée à celle signalée ci-dessus, représenterait une perte de poids de 1? 0/0 environ.

Enfin, *après un séjour de deux mois à deux mois et demi* dans l'appareil frigorifique, la viande subirait une plus grande dépréciation ; car, outre la perte de substance déterminée par le rafraichissement des parties superficielles, il faudrait ajouter l'inutilisation des parties minces qui, comme la bavette, perdaient toutes leurs propriétés comestibles par suite de l'accentuation de l'état de sécheresse. *Dans les parties épaisses*, comme la cuisse, par exemple, *la conservation s'établit parfaitement*, la perte de poids devient insignifiante, car la dessication n'atteint que les parties superficielles. En effet, après avoir enlevé la graisse qui tapissait la cuisse, nous avons constaté que *la couche de dessication* était superficielle, et *n'avait guère qu'une épaisseur d'un millimètre environ.*

Le mouton entier s'est admirablement comporté pendant une durée de 30 à 40 jours. Passé ce laps de temps, le mouton écasillé s'est trop desséché, et il aurait été imprudent de le conserver davantage. D'ailleurs, le mouton étant moins épais que le bœuf, se détériore plus vite par sa sécheresse, et la perte de poids est deux fois plus sensible que celle du bœuf.

Il résulte donc de ces expériences, qu'il ne faudra pas espérer conserver la viande à l'état frais pendant une période de plus de *six semaines à deux mois*, sans quoi, on s'exposerait à de trop grandes pertes provenant de la dessication et du déchet resultant du rafraichissement de la viande. Une surveillance très fréquente et très active sera toujours nécessaire pour visiter cette viande et enlever au fur et à mesure les pièces qui commenceraient à se détériorer. *Pour la conserver au dela de deux mois*, il sera indispensable de la congeler à basse température, et de la maintenir ensuite dans un entrepôt frigorifique à une température de 3 ou 4° au-dessous de zéro. Dans cet état, elle pourra être conservée pendant plusieurs mois. .....

L'importance des résultats constatée par la chambre syndicale des bouchers de Paris est d'autre part confirmée par l'extrait suivant, présenté en février 1890 au Conseil municipal par M. *Deligny*, président de la Commission municipale d'approvisionnement de Paris (1).

« La nécessité de conserver aux viandes placées dans les entrepôts frigorifiques leur valeur commerciale, s'impose dans les conditions ordinaires de l'alimentation. Si cette valeur était sacrifiée ou simplement atténuée par le séjour des viandes dans les entrepôts, leur débit serait compromis et il ne pourrait plus s'effectuer sans perte d'argent plus ou moins considérable.....

« J'ai déjà dit que, dans tous les cas, soit pour la conservation à court terme, soit pour un long séjour dans les entrepôts, il était indispensable, qu'aussitôt après l'abattage la viande fût amenée à une température de 0 à + 3 degrés pour le premier cas, et fût congelée pour le second cas, et cela, dans un délai ne laissant pas aux germes de l'altération organique le temps d'entrer en action. Nous insistons absolument sur cette condition, et c'est souvent parce que l'on ne l'avait pas observée rigoureusement que des échecs ont été constatés.

« Pour le service ordinaire, un abaissement rapide à zéro degré sans congélation est suffisant. Il faut seulement le continuer jusqu'à ce que toute l'épaisseur des pièces de viande accrochées séparément les unes des autres ait été abaissée à la

1. *Bulletin municipal officiel*, 6 février 1890.

température voulue de 0 à + 3 degrés. Il n'y a plus ensuite qu'à entretenir dans cet état tout l'entrepôt, en faisant un apport d'air froid qui compense les pertes de froid dues aux parois du local et aux entrées et sorties nécessaires du service....

« Il résulte de nos propres observations et des nombreux témoignages que nous avons recueillis, que *l'air doit être le seul véhicule du froid dans l'entrepôt lui-même, que cet air doit arriver « très-sec »* et que, sortant réchauffé et imprégné de l'humidité des viandes, il doit être, s'il rentre dans l'entrepôt, refroidi et desséché hors de l'entrepôt.

« *Le refroidissement de l'entrepôt frigorifique par des surfaces réfrigérantes doit être abandonné;* il l'est par les meilleurs praticiens.

« On doit donc tout d'abord observer cette prescription dans l'établissement de tous les entrepôts sans exception.

« Dans les entrepôts de service ordinaire, l'apport de l'air froid et sec doit pouvoir être varié comme nous l'avons indiqué déjà en traitant du mode d'application.

« L'espace, autant que possible, ne doit pas être ménagé, afin de faciliter les opérations journalières des bouchers pour l'entrée et la sortie des marchandises. En ne logeant que 100 kilogrammes de viande par mètre cube de capacité des loges de l'entrepôt, on est dans les conditions d'un étal de boucher. Si l'on va à 200 kilogrammes, les mouvements deviennent difficiles, surtout pour les grosses viandes ; à 150 kilogrammes, ils ne sont que gênés. Les couloirs de service augmentent d'un tiers la capacité totale. »

La planche 23-24 représente l'ensemble de l'installation des appareils *Fixary* dans le sous-sol des *Halles de Bruxelles*. Cette installation, qu'il a fallu disposer dans une salle encombrée de piliers, comprend, outre le frigorifère de 50,000 calories un bac à glace de 500 kilogrammes à l'heure ; le tout desservi par un compresseur horizontal à double effet de 100,000 calories, ayant 280 millimètres de diamètre, 900 millimètres de course, et marchant à 55 tours. Le frigorifère est à trois serpentins (p. 177) en tubes de 30 × 37 millimètres, présentant une surface réfrigérant totale de 226^{mc} pour un volume à refroidir de 1250^{m3}. Le ventilateur débite 10 000^{m3} à l'heure.

L'installation de la *Compagnie frigorifique portugaise, à Lisbonne*, comprend (pl. 21-22) une machine *Fixary* horizontale du type de 100000 calories pouvant desservir un bac à glace de 750 kilogrammes à l'heure et un frigorifère Fixary de 25,000 calories à l'heure. Ce frigorifère refroidit actuellement une chambre de 800^{m3} qui sera bientôt porté à 1200^{m3}. En marche normale, le ventilateur du frigorifère débite à l'heure 4500^{m3} d'air à — 5°, répartis uniformément et sans courant d'air par un système de canaux en bois percés de nombreuses ouvertures. On maintient ainsi facilement la chambre entre + 2 et + 4°,

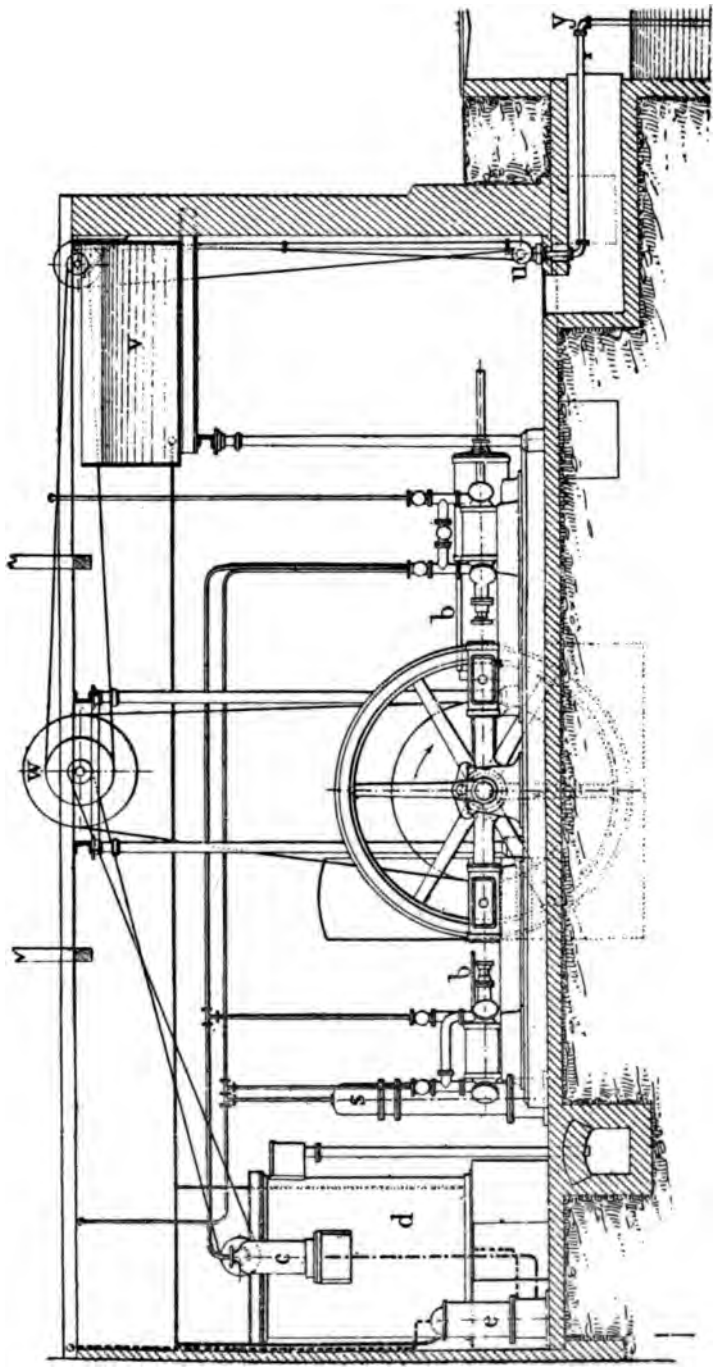


Fig. 160. — *Frigorifère Fixary de Crefeld.* — Coupe CD, planche 17-18. (Échelle 0m,01 par mètre)

température qui convient parfaitement à l'entreposition des viandes fraîches. On a pu d'ailleurs amenée sans peine la salle à —5°, avec une température extérieure de 30°.

Le *frigorifère de Créfeld* a été installé par la Société Humboldt de Kalk, concessionnaire du breveté *Fixary* en Allemagne, sous la direction de M. *Schmidt*. La salle à refroidir (pl. 17 et 18, fig. 160 et 161) a 2790^{m3}, avec une surface de planches de 930 mètres carrée ; la salle est divisée en 161 compartiments à viandes, de $2^m,25 \times 3^m,15 \times 4^m,50$ séparés les uns des autres par des grillages en fer galvanisé. Les parois de la salle sont formés de trois murailles séparées par des tranches d'air, avec doubles fenêtres et portes à tambour ; le plafond est en petites voutes de briques creuses sur fers à T, revêtues d'une couche de tourbe de $0^m,500$, et couvertes par un toit en pâte de bois.

Lors de la mise en marche, la température extérieure variait de 16° le jour, à 7° la nuit ; il fallut deux jours pour abaisser la température de la salle de +15° à 0°. Cette température fut ensuite amené à — 6°.

Le frigorifère abaissait, par heure, 21000^{m3} de 0 à —13°, ce qui correspond à une puissance *effective* d'environ 70,000 calories négatives, avec une surface utile de serpentin de 190^{m2}, soit environ 400 calories négatives par heure et par mètre carré de serpentin.

Chacun des deux compresseurs Fixary, dont un de rechange, du type de 100 000 calories, produit en outre 375 kilogrammes de glace à l'heure, correspondant à un débit utile de 37500 calories négatives. Sa puissance frigorifique utile totale est donc de 110,000 calories environ. Le travail indiqué de la machine à vapeur est de 65 chevaux. L'ensemble de l'installation, frigorifère et bac à glace, a donc un rendement de 1700 calories négatives environ par cheval-heure indiqué, tandis que l'on compte, en général, pour le refroidissement de l'air au-dessous de zéro par les circulations de liquides incongelables, sur un rendement de 1200 calories environ. Les résultats obtenus à Créfeld avec le frigorifère Fixary sont donc des plus satisfaisants.

On peut évidemment appliquer à la préservation temporaire de la viande dan les entrepôts les systèmes de refroidissement de l'air par le rayonnement de tuyaux ou de parois à liquide incongelable (*Pictet*, *Shrœder*, *Linde*, *Pontifex et Wood*(1), ou à gaz détendu (*Lavergne*, *Popp*) (2) suspendus au plafond des caves, et plus coûteux que les frigorifères à canaux de bois. M. *Osenbrück* a aussi appliqué à l'entrepôt de Brême le refroidissement de l'air par son passage sur un

1. *Chronique industrielle*, 8 et 15 septembre 1889. *Annales industrielles*, 19 mai 1889. *The Engineer*, 27 septembre 1889.

2. Brevet anglais 18948 de 1888. *Revue scientifique*, 27 juillet 1889, p. 91.

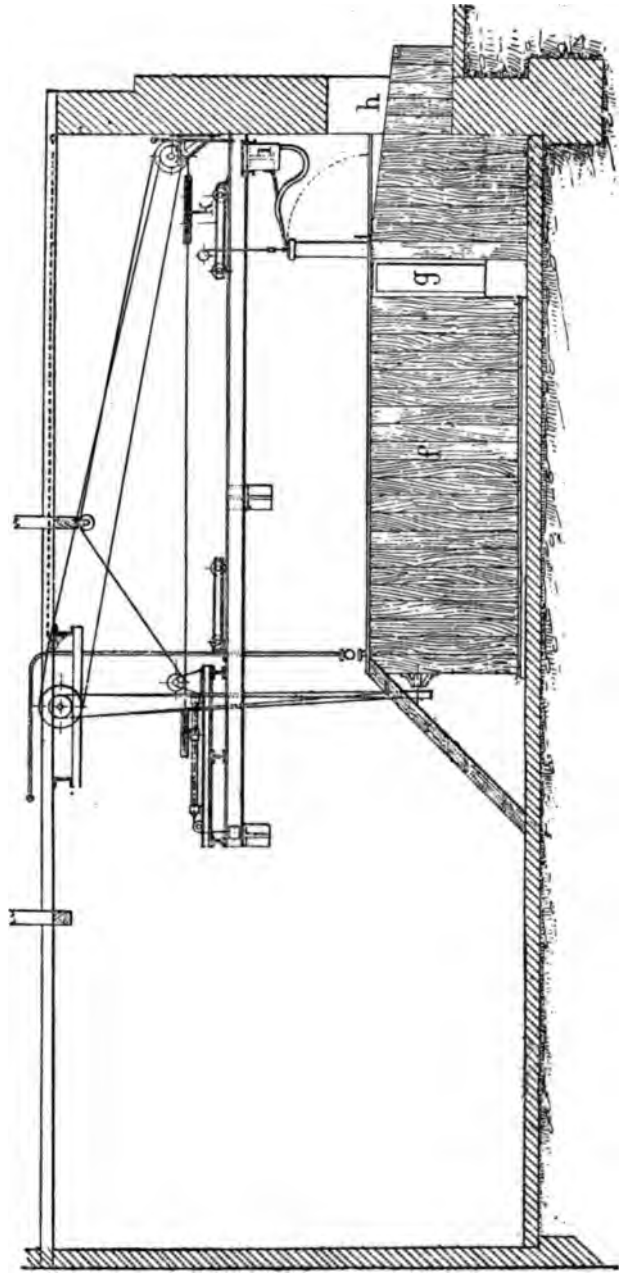


Fig. 161. — *Frigorifère Fixary de Créfeld.* — Coupe EF, pl. 17-18.

Installation du bac à glace. (Échelle 0m,01 par mètre)

liquide incongelable (p. 152). MM. *Greathead* et *Sterne* ont proposé (1) d'emmagasiner les viandes dans des puits congelés et refroidis à l'abri des variations atmosphériques.

Les chambres de conservation sont rarement maintenues à une température inférieure à zéro ; il est prudent, lorsqu'on y débarque des viandes gelées à fond, de laisser ces viandes acquérir lentement une température de 4° environ, et d'employer pour leur transbordement, lorsque le mouillage l'exige, des allèges frigorifiques analogues à celles de M. *S. Puplett* (2).

MM. *Rouart frères* exposaient en 1889 des caisses à conserver les viandes gelées constituées essentiellement par des récipients métalliques à doubles parois entre lesquelles se trouve une couche d'eau salée gelée à — 5° environ. — Cette congélation s'opère au moyen d'un serpentin qui traverse cette muraille d'eau, et dans lequel on fait circuler un liquide incongelable à — 20°. L'extérieur de la caisse, à laquelle on donne la forme la plus convenable pour son transport, est enveloppé de matières non conducteur. Il suffit, après un voyage, de remettre le serpentin de la caisse en communication avec une machine frigorifique pour la recharger de froid.

Les *wagons pour le transport des viandes gelées* sur les voies ferrées n'existent pour ainsi dire pas en Europe, mais ils fonctionnent en très grand nombre aux États-Unis. le plus souvent entre deux magasins de conservation. Ce sont presque toujours des glacières convenablement isolées par des parois de feutre et d'air inerte ou circulant à volonté. L'eau provenant de la fusion de la glace doit pouvoir être évacuée à mesure sans toucher la viande. Nous citerons, parmi les systèmes les plus répandus aux Etats-Unis, ceux de *Dalton Mann* (3), de *Tiffany* (4), de *Roberts* (5), de *Boult* (6) et de *Wickes* (7) : dans ces derniers comme dans ceux de *Knott* (8), l'air n'est jamais renouvelé; un ventilateur le fait constamment passer et repasser sur la glace. Les wagons de *Tallerman Grunning* et *Dawnay* peuvent fonctionner avec un renouvellement d'air nul ou variable à volonté (9). M. *Binder*, ingénieur de la *Staats Bahn* (10), MM. *Dreher*, *Tourtel* et *Dietrich* (11) ont adopté des dispositifs anologues

1. Brevet anglais 13276 de 1887.
2. Brevet anglais 17756 de 1887.
3. Spon, *Dictionary of Engineering*, suppl. p. 1017.
4. Lavoinne et Pontzen. *Les Chemins de fer en Amérique*, vol. 2, p. 83. Brevet anglais 1226 de 1877.
5. Brevet anglais 3398 de 1877.
6. id. 416 de 1889.
7. Lavoinne et Pontzen, vol. 11, p. 45.
8. Spon, *Dictionary of Engineering*, suppl. p. 1019.
9. id. suppl. p. 1020.
10. Couche, *Voie et matériel roulant*, vol. 2, p. 200.
11. *Revue générale des Chemins de fer*, mars 1888.

pour le transport des bières. Quelques inventeurs ont tenté de constituer de véritables trains réfrigérants entretenus par le fonctionnement d'une machine à air placée sur la locomotive (1) ou par la détente d'un provision de gaz liquéfié (2), mais la complication, le prix élevé et la spécialisation trop exclusive de ces appareils les ont fait, jusqu'à présent, rejeter comme inapplicables *à priori*.

Poissons. — Les procédés que nous venons d'indiquer pour la conservation des viandes s'appliquent ausi à celle des poissons, mais plus facilement. On peut porter les poissons à une très basse température, — 20°, puis les conserver très longtemps à cet état de glaçons sans en dénaturer sensiblement la saveur.

Lait. — La *conservation du lait* par le froid est aussi l'une des plus intéressantes : son principal concurrent est la pasteurisation, qui stérilise les ferments du lait par un chauffage à 80° environ, mais en lui donnant un goût de lait cuit peu en faveur (3). Le froid n'a pas cet inconvénient. On emploie pour conserver le lait par le froid deux méthodes : le refroidissement à 3° ou 4° sur des Baudelots ou dans des appareils à circulation fermés, comme ceux de M. *Lezé* (4) et la congélation véritable, brusque, à — 20° environ, dans des mouleaux fermés, que l'on dégèle pour la consommation [procédé *Guérin* (5)].— Ce dernier procédé donne un lait d'un goût parfait et d'un transport très avantageux. L'industrie de la conservation du lait est encore trop peu répandue pour que l'on puisse porter un jugement définitif sur ces différents procédés ; mais la congélation présente des avantages de manipulation tels qu'elle serait probablement préférée, pour les grandes expéditions, du moins.

---

1. *James Coleman.* Brevet anglais 638 de 1882.
2. *Clay et Johnson.* Brevet anglais 12917 de 1885.
3. Duclaux, *Annales de l'institut Pasteur*, janvier 1889. De Saporta, *Revue des deux mondes*, 15 décembre 1889.
4. *Machines à glace*, 1889, p. 175.
5. *Moniteur industriel*, 6 décembre 1884, p. 391.

liquide incongelable (p. 152). MM. *Greathead* et *Sterne* ont proposé (1) d'emmagasiner les viandes dans des puits congelés et refroidis à l'abri des variations atmosphériques.

Les chambres de conservation sont rarement maintenues à une température inférieure à zéro ; il est prudent, lorsqu'on y débarque des viandes gelées à fond, de laisser ces viandes acquérir lentement une température de 4° environ, et d'employer pour leur transbordement, lorsque le mouillage l'exige, des allèges frigorifiques analogues à celles de M. *S. Puplett* (2).

MM. *Rouart frères* exposaient en 1889 des caisses à conserver les viandes gelées constituées essentiellement par des récipients métalliques à doubles parois entre lesquelles se trouve une couche d'eau salée gelée à — 5° environ. — Cette congélation s'opère au moyen d'un serpentin qui traverse cette muraille d'eau, et dans lequel on fait circuler un liquide incongelable à — 20°. L'extérieur de la caisse, à laquelle on donne la forme la plus convenable pour son transport, est enveloppé de matières non conducteur. Il suffit, après un voyage, de remettre le serpentin de la caisse en communication avec une machine frigorifique pour la recharger de froid.

Les *wagons pour le transport des viandes gelées* sur les voies ferrées n'existent pour ainsi dire pas en Europe, mais ils fonctionnent en très grand nombre aux États-Unis. le plus souvent entre deux magasins de conservation. Ce sont presque toujours des glacières convenablement isolées par des parois de feutre et d'air inerte ou circulant à volonté. L'eau provenant de la fusion de la glace doit pouvoir être évacuée à mesure sans toucher la viande. Nous citerons, parmi les systèmes les plus répandus aux Etats-Unis, ceux de *Dalton Mann* (3), de *Tiffany* (4), de *Roberts* (5), de *Boult* (6) et de *Wickes* (7) : dans ces derniers comme dans ceux de *Knott* (8), l'air n'est jamais renouvelé; un ventilateur le fait constamment passer et repasser sur la glace. Les wagons de *Tallerman Grunning* et *Dawnay* peuvent fonctionner avec un renouvellement d'air nul ou variable à volonté (9). M. *Binder*, ingénieur de la *Staats Bahn* (10), MM. *Dreher*, *Tourtel* et *Dietrich* (11) ont adopté des dispositifs anologues

1. Brevet anglais 13276 de 1887.
2. Brevet anglais 17756 de 1887.
3. Spon, *Dictionary of Engineering*, suppl. p. 1017.
4. Lavoinne et Pontzen. *Les Chemins de fer en Amérique*, vol. 2, p. 83. Brevet anglais 1226 de 1877.
5. Brevet anglais 3398 de 1877.
6. id. 416 de 1889.
7. Lavoinne et Pontzen, vol. 11, p. 45.
8. Spon, *Dictionary of Engineering*, suppl. p. 1019.
9. id. suppl. p. 1020.
10. Couche, *Voie et matériel roulant*, vol. 2, p. 200.
11. *Revue générale des Chemins de fer*, mars 1888.

pour le transport des bières. Quelques inventeurs ont tenté de constituer de véritables trains réfrigérants entretenus par le fonctionnement d'une machine à air placée sur la locomotive (1) ou par la détente d'un provision de gaz liquéfié (2), mais la complication, le prix élevé et la spécialisation trop exclusive de ces appareils les ont fait, jusqu'à présent, rejeter comme inapplicables *à priori*.

Poissons. — Les procédés que nous venons d'indiquer pour la conservation des viandes s'appliquent ausi à celle des poissons, mais plus facilement. On peut porter les poissons à une très basse température, — 20°, puis les conserver très longtemps à cet état de glaçons sans en dénaturer sensiblement la saveur.

Lait. — La *conservation du lait* par le froid est aussi l'une des plus intéressantes : son principal concurrent est la pasteurisation, qui stérilise les ferments du lait par un chauffage à 80° environ, mais en lui donnant un goût de lait cuit peu en faveur (3). Le froid n'a pas cet inconvénient. On emploie pour conserver le lait par le froid deux méthodes : le refroidissement à 3° ou 4° sur des Baudelots ou dans des appareils à circulation fermés, comme ceux de M. *Lezé* (4) et la congélation véritable, brusque, à — 20° environ, dans des mouleaux fermés, que l'on dégèle pour la consommation [procédé *Guérin* (5)].— Ce dernier procédé donne un lait d'un goût parfait et d'un transport très avantageux. L'industrie de la conservation du lait est encore trop peu répandue pour que l'on puisse porter un jugement définitif sur ces différents procédés ; mais la congélation présente des avantages de manipulation tels qu'elle serait probablement préférée, pour les grandes expéditions, du moins.

---

1. *James Coleman.* Brevet anglais 638 de 1882.
2. *Clay et Johnson.* Brevet anglais 12917 de 1885.
3. Duclaux, *Annales de l'institut Pasteur*, janvier 1889. De Saporta, *Revue des deux mondes*, 15 décembre 1889.
4. *Machines à glace*, 1889, p. 175.
5. *Moniteur industriel*, 6 décembre 1884, p. 391.

Résumé et Conclusions

La théorie des machines frigorifiques, bien qu'encore incomplète, est néanmoins connue depuis longtemps avec une exactitude suffisante pour guider le praticien dans l'application rationnelle des principes essentiels à leur bon fonctionnement. Si la construction des machines frigorifiques ne s'est développée notablement que dans ces dix dernières années, ce n'est pas à l'insuffisance de données théoriques qu'il faut attribuer ce développement tardif, mais plutôt aux difficultés d'exécution que comporte l'établissement de ces machines, et à ce que les divers procédés industriels qui les emploient aujourd'hui ne sont parvenus qu'à une date relativement récente au développement ou à une perfection justifiant cet emploi. Il me suffira de citer les nouvelles méthodes qui ont transformé les procédés anciens de la brasserie, et l'accroissement que prend chaque jour l'industrie de la conservation des viandes et produits alimentaires.

Les progrès réalisés dans la construction peuvent se mesurer par ce fait que l'on construit aujourd'hui couramment des machines à gaz ammoniac liquéfié de 1000 à 1500 kilogrammes de glace à l'heure, alors que l'on considérait, il y a quinze ans, la fabrication d'une petite machine de ce type comme un tour de force, avec bien plus d'appréhension que l'on n'en met actuellement à entreprendre la construction de machines à acide carbonique. Ce n'est pas à dire que, dès maintenant, toutes les difficultés afférentes à la haute pression de ce dernier gaz soient vaincues au point qu'il faille, même pour les pays tempérés, le préférer à tout autre : c'est une question encore indécise, mais il n'en est pas moins vrai que la liquéfaction du gaz acide carbonique est passée de l'état d'expérience de laboratoire dangereuse à l'état d'opération industrielle encore délicate, mais courante et sans danger.

Pour le moment, dans nos climats du moins, le gaz préféré est l'ammoniac anhydre, que l'on se procure facilement par la distillation de l'ammoniac du commerce ; on l'emploie indifféremment dans les machines à compression et à affinité. La lutte reste ouverte entre ces deux systèmes, qui paraissent équivalents, du moins dans les essais de concours, avec des appareils neufs, conduits par des hommes exercés à leurs manœuvres. Nous nous sommes efforcé de présenter le plus équitablement possible le pour et le contre des deux systèmes, mais nous ne pouvons nous empêcher de signaler la préférence accordée par la pratique aux machines à compression, dont la complication apparente disparaît dans la plupart des applications, où la chaudière et le moteur à vapeur servent en même temps à d'autres emplois que l'actionnement du compresseur. Quoi qu'il en soit, l'on n'entrevoit, dans l'amérioration possible de ces deux types de ma-

chines, à compression et à affinité, aucun perfectionnement de principe : elles paraissent parvenues, comme la machine à vapeur, à ce point de leur développement où le progrès ne se manifeste plus que par des raffinements et des simplifications dans le détail des organes essentiels, ou par des hardiesses de plus en plus heureuses dans l'augmentation de la puissance des appareils.

Il en est sans doute de même pour les machines à air : la théorie semble avoir donné tout ce qu'elle renferme d'essentiel, et la principale difficulté, la congélation de l'humidité de l'air, paraît avoir été vaincue autant qu'on peut le désirer en pratique. Ainsi que nous l'avons dit, nous pensons que ces machines sont, malgré leur rendement frigorifique inférieur, nettement indiquées pour les applications où la question du rendement n'est plus que secondaire, où la sécurité absolue prime tout, et pour certains cas où il s'agit d'utiliser directement l'air à de très basses températures. Tel est le cas du refroidissement des cales de navires pour le transport des viandes ; application importante, et pour laquelle les machines à air ont conservé jusqu'à présent une sorte de monopole en apparence parfaitement justifié.

S'il semble qu'il y ait, dans le perfectionnement des machines frigorifiques, peu de progrès importants à réaliser, il n'en est pas de même dans leurs applications, dont la plupart naissent à peine, où presque tout est à faire, sauf dans l'application la plus importante : la fabrication de la glace.

C'est ainsi que les applications des machines frigorifiques au *refroidissement de l'air* sont très imparfaites, parfois même ignorées ; on n'a même pas abordé la question du rafraîchissement artificiel des édifices et salles de réunion, aussi importante, dans bien des cas, que celle de leur chauffage, aussi complexe et de même nature, au moins en ce qui concerne la distribution et le renouvellement de l'air froid, et d'autant plus intéressante que la civilisation gagne plus vers les pays chauds [1]. Actuellement, deux méthodes générales sont en présence : la production directe de l'air froid par des machines à air, et sa production indirecte à l'aide de frigorifères activés par des machines à compression ou à affinité. On est à peu près fixé sur la première méthode, qui semble avoir donné presque tout ce que l'on peut en espérer : une atmosphère refroidie par la diffusion de petits volumes d'air très froids et secs obtenus au moyen de machines robustes, sûres, mais bruyantes, vite fatiguées et chères de combustible. L'autre méthode, qui procède par le refroidissement de grandes masses d'air à des températures modérées et d'une répartition plus facile, obtenu au moyen d'appareils économiques mais plus compliqués et plus coûteux d'établissement paraît théoriquement préférable, à terre du moins, mais n'a pas encore reçu en raison de sa nouveauté même, la sanction d'une pratique aussi étendue.

1. Consulter le mémoire de sir William Thomson. « *On the Economy of the Heating or Cooling of Buildings by Means of Currents of Air.* » *Philosophical Society of Glascow, Proc.* Décembre 1852, vol. III, p. 270.

La conservation des viandes, qui n'est elle-même qu'une application intéressante de l'air froid, vient aussi à peine d'entrer dans sa période véritablement industrielle ; mais son développement, qui dépend en grande partie des perfectionnements à apporter dans la production et la distribution de l'air froid, dépend aussi de circonstances particulières, telles, par exemple, qne la possibilité d'aménager facilement, sur le navire frigorifique, des frets de retour. La question ne se présente pas non plus sous les mêmes aspects suivant qu'il s'agit de conserver à bord d'un navire, et dans un espace très resserré, des viandes gelées d'avance, ou de préserver des produits alimentaires dans un entrepôt de conservation, pour l'approvisionnement d'une ville ou d'une forteresse. Dans ce cas, la place ne manque pas ; on peut y traiter les viandes, surveillées à loisir, avec plus de ménagements, par des procédés plus économiques que sur les navires, et sans les congeler. La lutte est actuellement ouverte, pour cette nouvelle application du froid, entre deux méthodes de refroidissement des salles. : l'une procède par le rayonnement des serpentins à circulation de liquide incongelable, comme c'est la règle dans les caves de brasserie, l'autre par l'injection et la dispersion d'air produit directement en petites masses très froides, au moyen des machines à air, ou indirectement, en grands volumes à température moins basse, au moyen de frigorifères actionnés par des machines à gaz liquéfiés.

L'industrie de la fabrication de la glace artificielle, que l'on se procure aujourd'hui presque partout à meilleur compte que la glace naturelle, se développe aussi chaque jour, et peut à peine suffire à la demande ; mais il ne nous paraît pas que sa technologie soit susceptible de grands progrès. De toutes les méthodes proposées pour assurer à la glace la transparence exigée par la consommation, l'utilisation directe ou indirecte de la vapeur d'échappement du moteur des machines frigorifiques à air ou à compression paraît le plus économique et le plus rationnel.

Quant aux autres applications du froid, leur examen détaillé ne saurait faire l'objet de ce Mémoire : il fait partie de la technologie même des industries dans lesquelles ces applications jouent un rôle plus ou moins important, où l'on utilise le froid soit directement, soit au moyen d'appareils dont l'adaptation particulière ne dépend souvent en rien de la source même du froid. Ces applications sont, comme nous l'avons vu, très nombreuses ; elles se développent et se multiplient chaque jour ; le constructeur de machines frigorifiques a le plus grand intérêt à les connaître et à les provoquer, plus d'intérêt même, dans bien des circonstances, qu'à chercher à perfectionner encore sa machine.

OBSERVATIONS SUR LA COMMUNICATION PRÉCÉDENTE DE M. G. RICHARD RELATIVE AUX MACHINES A FROID

Observation de M. Diesel, Ingénieur civil

M. Richard vient de nous présenter avec une compétence tout à fait remarquable un exposé sur la production et l'utilisation du froid. Ceux qui s'occupent de ces questions ne sauraient être assez reconnaissants à M. Richard de cet important mémoire, qui représente une somme de travail énorme, et qui est basé sur des recherches approfondies dans les brevets de tous les pays, puisque M. Richard ne cite et n'explique pas moins de 246 brevets différents.

Il s'en dégage tout d'abord l'impression que la question du froid industriel doit avoir une importance tout à fait hors ligne, puisque des centaines de constructeurs s'en occupent et qu'autant de noms sont attachés à des innovations, des détails de construction, des propositions de liquides nouveaux, etc. Il y a quelques années encore, on pouvait parfaitement avoir une vue d'ensemble sur cette question, mais aujourd'hui cela me semble impossible, tellement sont nombreuses les inventions qui surgissent de tous côtés. Nous sommes en train de nous perdre dans les détails et les nouveautés ; le fil, la direction où nous allons ne s'aperçoivent plus clairement. Mais, puisque nous voilà réunis — pour la première fois, je crois — en un congrès spécial sur cette question, il me semble qu'il serait d'un réel intérêt et d'une utilité incontestable de chercher à grouper les divers efforts qui se sont produits, à en déduire ce qu'il est bon de poursuivre et ce qu'il y a lieu d'abandonner, à montrer une voie enfin nette et distincte.

Je vais faire un modeste essai de ce genre, heureux s'il peut être le point de départ d'une discussion plus approfondie, de laquelle on pourrait faire jaillir quelques axiomes immuables.

Il est assez difficile de trouver une voie pour comparer la légion de mécanismes divers qui existent, il faut plutôt poser certains principes, et voir ensuite si tel appareil s'y conforme. A ce point de vue, il existe un certain nombre de préjugés absolument enracinés chez quelques-uns de ceux-là même qui construisent les machines, et surtout chez le public qui ne va pas au fond de la question. Je vais discuter les principaux de ces préjugés, en restreignant mon sujet aux ma-

chines à compression parce qu'elles sont sans contredit de beaucoup les plus importantes et les plus répandues.

Tout d'abord, on répète partout, avec la plus grande conviction, que l'acide sulfureux est un corps lubrifiant et, qu'en l'employant, on peut supprimer tout graissage ; se basant sur ce précédent, tous les constructeurs qui emploient des liquides binaires contenant plus ou moins d'acide sulfureux, et même des constructeurs qui se servent de corps spéciaux (chlorure de méthyle, etc.), répètent, qu'avec leur machine, le graissage est inutile.

Examinons le bien fondé de cette thèse. Que se passe-t-il dans un cylindre compresseur ? On aspire des vapeurs saturées, sèches par conséquent, et on les refoule ensuite au condenseur ; pendant ce refoulement, la vapeur se surchauffe assez fort *dans toutes les machines* (sauf quelques rares exceptions qui ne tombent pas sous les considérations actuelles). Or, qui peut prétendre qu'une vapeur sèche, et, encore mieux, une vapeur surchauffée, soit capable de lubrifier un piston, une tige et des clapets. Personne ne peut contester la surchauffe, puisque toutes ces machines emploient des circulations d'eau autour du cylindre dans la tige et dans le piston ; j'ai vu une machine Pictet nouveau système où l'eau introduite dans le piston ne sortait plus comme eau, mais comme vapeur, avec une certaine force et un certain bruit, ce qui indique que la surchauffe dépassait 100°. Il est donc certain que les cylindres compresseurs travaillent à sec, absolument à sec et qu'il n'y est pas question de graissage. D'ailleurs, en voyant ces machines en fonction, on entend des clapotements, des frottements, et on a l'impression d'une marche pénible, surtout lorsqu'on a l'occasion de comparer en même temps la marche d'un compresseur bien graissé ou même d'une machine à vapeur ordinaire. J'ajoute, qu'à ce point de vue, tous les liquides employés sont égaux ; sous forme liquide, ils ont tous des qualités plus ou moins lubrifiantes, à peu près comme de l'eau ; mais comme, dans les compresseurs, la forme liquide n'apparaît pas, je prétends qu'aucun corps intermédiaire ne lubrifie les compresseurs et que, si l'on supprime le graissage, c'est au détriment de la conservation de la machine et aux frais de la force motrice qui devient plus considérable, sans compter la diminution du rendement occasionnée par les fuites à travers des segments et des clapets tout à fait secs et toujours en mauvais état d'entretien.

Cette première condition permet immédiatement une conclusion qui est celle-ci : Tout compresseur non graissé, de quel système qu'il soit, absorbera plus de force motrice, donnera un moindre rendement et sera beaucoup plus mal entretenu, *durera moins* que le même compresseur graissé. L'idée qu'un corps volatil peut lubrifier un compresseur est une erreur qu'il faut déraciner.

C'est pénétrés de cette vérité : *Il faut que les compresseurs soient graissés*, que nous voyons un grand nombre de constructeurs employer des bains d'huile :

bains d'huile sur le stuffing-box, bain d'huile sur le piston, bain d'huile autour des clapets, etc.; ces bains d'huile, avec pompes de circulation, sont bien l'objet de la plupart des brevets, surtout pour les compresseurs à ammoniac. C'est surtout le désir de supprimer l'espace nuisible qui a donné lieu à la création des compresseurs verticaux avec couche d'huile sur le piston; il y a 5 ou 6 systèmes qui poursuivent avant tout ce but. Or, ici encore, il y a préjugé, erreur provenant de ce que l'on n'a jamais pu voir ce qui se passait dans l'intérieur d'un compresseur; mais, si on ne peut pas le voir, on peut essayer de le deviner en se basant sur des observations.

Toutes les huiles employées au graissage ont un certain pouvoir absorbant pour l'ammoniac; ce pouvoir absorbant, très faible sous la pression atmosphérique, devient très sensible sous les pressions de 9 ou 10 kilogrammes qui règnent dans les compresseurs. J'en ai fait souvent l'expérience et je la répéterai devant qui voudra la voir : en lâchant à l'atmosphère l'huile retenue dans les séparateurs des machines à compression d'ammoniaque, on voit sortir par le robinet une mousse légère; on a vite fait de remplir un seau de 12 litres de cette mousse; lorsqu'on la laisse ensuite deux ou trois heures au repos, elle se condense lentement, en dégageant son ammoniac, et il reste 1/4 ou 1/5 de litre d'huile liquide. Le même fait se produit dans les compresseurs. Supposez une couche d'huile sur le piston sous la pression du refoulement, et entièrement saturée de gaz. Dès que le piston redescend, il y a diminution brusque de la pression qui tombe de 9 ou 10 à 1 ou 2 kilogrammes. Il en résulte une formation de mousse tumultueuse avec dégagement abondant de gaz ammoniacal, et cela jusqu'à la désaturation de l'huile; par conséquent, retard considérable dans l'ouverture du clapet d'aspiration et augmentation, en une très forte proportion, de l'espace nuisible qu'on se proposait de supprimer.

En dehors de cela, on voit que la couche d'huile sur le piston n'existe pas; en somme; après quelques coups de piston, elle est transformée en mousse, en bouillie, qui pénètre dans tous les tuyaux, les tapisse, empêche la transmission du calorique, et peut causer des obstructions.

Conclusion : *Le bain d'huile sur le piston ne supprime pas l'espace nuisible, mais l'augmente;* la suppression presque complète de l'espace nuisible doit être produite *mécaniquement*, en faisant presque toucher le piston sur les deux fonds, et en construisant avec une rigoureuse exactitude; c'est ce qui est fait dans la machine Linde.

Le bain d'huile a en outre l'inconvénient de produire des mousses qui remplissent toutes les tuyauteries et empêchent l'action des surfaces refroidissantes.

Il en résulte aussi que la *construction verticale*, faite exclusivement pour le maintien du bain d'huile, doit être abandonnée pour la construction horizontale, qui offre d'énormes avantages au point de vue mécanique. Il en résulte enfin

que la construction à simple effet, qui est également une conséquence du bain d'huile, est non seulement inutile mais nuisible, car elle entraîne 2 pistons, 2 tiges, 2 stuffing-box, 2 bielles ..... au lieu d'une, par conséquent plus d'entretien, plus de travail nuisible, de frottements ..... et surtout l'entretien de 2 presse-étoupes au lieu d'un ; il faut chercher à diminuer le nombre de garnitures et non pas à les augmenter, car, nous le savons tous, là est justement le point délicat.

Et puisque j'en suis là, je vais maintenant parler d'un troisième préjugé plus récent que les autres, mais qui tend à se répandre rapidement, grâce à son nom, qui a un attrait tout spécial : le *joint pâteux;* ce mot produit un effet merveilleux, et pourtant un joint pâteux n'existe pas, ne peut pas exister.

Supposons une tige immobile dans le stuffing-box ; ce dernier muni d'une chambre remplie d'huile congelée par une circulation d'ammoniac. L'huile, la chambre, la tige ayant une même température basse, le tout sera gelé ensemble et par suite imperméable aux gaz. Mettons maintenant la tige en mouvement ; l'huile pâteuse qui y est attachée par congélation y restera adhérente ; le joint pâteux se déchirera au premier mouvement de la tige, et, mis en morceaux, n'existera plus.

En réalité, ce n'est pas cela qui se passe. La tige, sortant à l'air ambiant à chaque coup de piston et frottant dans ses garnitures, a toujours une température égale à peu près à la température extérieure, souvent même un peu plus élevée. Or, qu'arrive-t-il si on fait traverser une tige en fer, chaude de 20 à 30 degrés, dans une huile pâteuse ayant — 15 ou — 20 degrés. La tige fera dégeler l'huile tout autour d'elle sur une épaisseur plus ou moins forte ; en réalité, son entourage sera toujours liquide, même si, à une certaine distance, l'huile est effectivement congelée. Par conséquent, le joint est, comme tous les autres, en huile liquide, et toute la complication pour faire geler le joint est inutile et superflue ; du reste, à toutes les machines Fixary, on peut observer que la tige est recouverte d'une épaisse couche d'huile liquide, qui coule tout le long et vient se rassembler sur la bielle et l'arbre de couche.

Par contre, le joint pâteux suppose l'emploi d'une huile congelable ; or, comme cette huile, d'après les explications de M. Richard, est la même que celle qui est sur le piston ; et, comme nous avons vu tout à l'heure que cette huile forcément pénètre dans l'ensemble des tuyauteries, malgré les séparateurs d'huile qu'on peut employer, il en résulte que les serpentins du réfrigérant, aussi bien que tout le reste, contiendront de l'huile congelable ; l'huile, dans ce milieu, se gèlera véritablement, tapissera les tuyaux d'une façon autrement nuisible que la mousse dont nous parlions tout à l'heure ; des morceaux d'huile gelée obstrueront les tuyaux, les robinets, et l'application du joint congelé doit indubitablement entraîner à des chômages fréquents pour nettoyages, à des diminutions

considérables du rendement, à des obstructions complètes de la tuyauterie, qui peuvent, à l'occasion, caler la machine ou même la faire sauter ; sans compter que tous ces énormes inconvénients ne sont réellement pas compensés par un gain, puisque le *joint pâteux n'existe pas.*

Je ne puis donc, pour ma part, adhérer aux conclusions de M. Richard, qui insiste beaucoup sur ce joint, et dit qu'il présente la solution générale du problème.

La solution générale, à mon avis, et la plus simple, est le stuffing-box double avec chambre intermédiaire remplie d'huile, formant joint hydraulique, cette chambre étant réunie à l'aspiration par un petit tuyau et l'huile, étant, condition *sine qua non, incongelable.* Toutes les bulles de gaz traversent la première garniture retournent à l'aspiration. La seconde garniture ne supporte que la pression de l'aspiration, et n'a pas de gaz à retenir, mais simplement de l'huile liquide ; ces presse-étoupes, qui sont de M. Linde (et non pas à la glycérine et à une pression supérieure à celle de la compression, comme dit par erreur M. Richard) (1) ces presse-étoupes, dis-je, donnent des résultats parfaits, car il n'y a pas ombre de difficulté à retenir de l'huile sous une pression de 2 kilogrammes. Cette disposition a en outre l'avantage de supprimer tout autre graissage, car l'huile entraînée goutte à goutte par la tige dans le cylindre agit comme celle des graisseurs compte-gouttes des machines à vapeur. Cette huile est finement pulvérisée, elle fait corps pour ainsi dire avec le gaz et lubrifie on ne peut mieux les organes intérieurs ; comme elle est en quantité minime, les particules entraînées, malgré le séparateur d'huile, dans les serpentins n'y sont pas nuisibles ; comme elle est incongelable, elle n'obstrue jamais rien.

J'ajoute que, pour les pays tropicaux, où les pressions de refoulement peuvent atteindre 13 ou 14 kilogrammes, M. Linde a construit des *compresseurs compound* dont la partie avant, qui a les presse-étoupes, ne comprime que dans le réservoir intermédiaire, tandis que la partie arrière, qui n'a pas de presse-étoupes, comprime à la pression finale (2).

En dehors de cet avantage, le fonctionnement compound, lorsque les pressions sont élevées, offre les mêmes avantages que pour les machines à vapeur : diminution des effets des fuites et des espaces nuisibles, diminution des effets produits par la conductibilité des parois. Une telle machine est exposée par MM. Sulzer frères à la section Suisse ; c'est la première fois, je crois, que le fonctionnement compound est appliqué aux machines à froid et à ce point de vue seul cette exposition est remarquable.

1. D'après le brevet anglais de Linde n° 1458 de 1876 (GR).
2. Les figures ci-contre, extraites du brevet anglais *Lightfoot-Linde*, (n° 1875 du 4 février 1890) permettent de comprendre facilement le fonctionnement de ces machines compound.
Dans la disposition représentée par la figure 1, les deux compresseurs à double

Fig. 1.

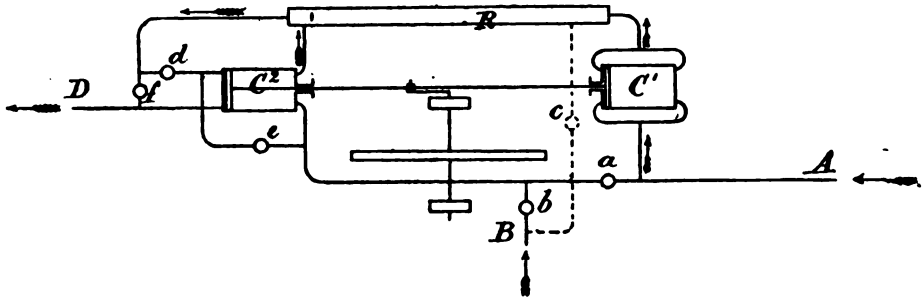


Fig. 2.

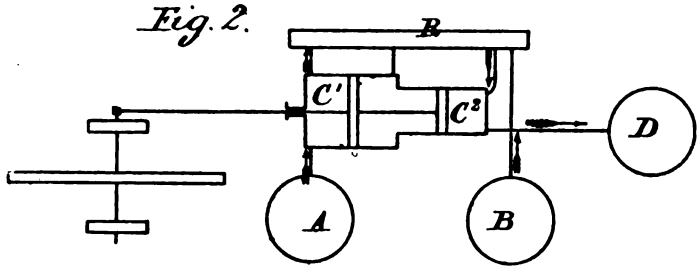


Fig. 3.

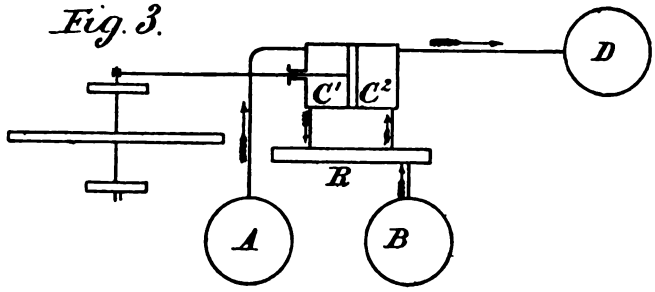
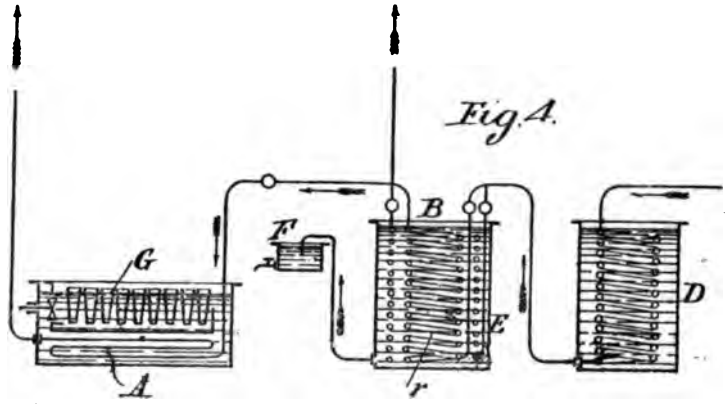


Fig. 4.



Passons maintenant à une autre série de propositions, et examinons le principe qu'elles représentent : je veux parler des machines à liquides binaires, dont le principal représentant est le *nouveau système Pictet*, qui emploie un mélange d'acide sulfureux et d'acide carbonique.

Les essais de M. Pictet, dont M. Richard nous a entretenus, paraissent avoir démontré que ce corps avait aux basses températures de pressions plus fortes que l'acide sulfureux pur, et, aux hautes températures, des pressions plus basses; conclusion : le travail utile de l'aspiration augmente, le travail résistant du refoulement diminue, et le rendement total augmente énormément. Cette thèse, venant de M. Pictet, a donné lieu à des polémiques prolongées auxquelles les plus grands savants ont pris part ; quelques-uns de ces derniers, séduits au commencement, sont totalement revenus aux données connues de la physique, surtout depuis que des essais faits à Berlin et à Genève, dont le rapport est devant moi, ont démontré clairement que la relation des pressions et températures indiquées par M. Pictet reposait sur des erreurs d'observation, et que le liquide binaire Pictet se comportait comme les autres.

Nous en concluons que l'avantage cherché : de diminuer la force motrice nécessaire même au-dessous de la quantité théoriquement nécessaire dans un cycle de Carnot parfait, n'existe pas. M. Pictet laisse la question ouverte, je crois qu'en fait elle est jugée [1]. En tous cas, cette catégorie de machines,

effet C_1 C_2 sont disposés de manière que les deux extrémités de C_1 et l'extrémité de droite, ou à stuffing-box de C_2 aspirent les gaz du bac à glace A (fig. 4) et le refoulent dans le réservoir intermédiaire R, tandis que la partie gauche de C_2, qui n'a pas de stuffing-box, aspire le gaz déjà comprimé en R et le refoule au condenseur liquéfacteur D.

En cas d'accident à l'un des compresseurs, les robinets *a b c d e f* permettent de marcher avec un seul des deux compresssurs, mis en communication directe avec le bac à glace et le condenseur.

Dans la disposition représentée par la figure 2, les deux pistons des compresseurs à simple effet C_1 et C_2 sont enfilés sur une même tige. Le cylindre C_1 aspire le gaz du bac à glace A et le refoule au réservoir intermédiaire R; le petit cylindre C_2 reçoit le gaz de R, et le refoule au condenseur D. L'espace compris entre les pistons de C_1 et de C_2 communique constamment avec le réservoir intermédiaire R.

Dans la disposition représentée par la figure 3, un même compresseur agit à basse pression par son extrémité de gauche, et à haute pression par son extrémité de droite, qui n'a pas de stuffing-box.

La figure 4 représente la disposition du condenseur intermédiaire B, ou refroidisseur auxiliaire, que l'on voit, sur les figures 1, 2 et 3, en communication avec le réservoir intermédiaire R. Ce refroidisseur B renferme deux serpentins, dont l'un *r*, amène l'ammoniac du condenseur D au bac à glace A, et dont l'autre, E, est traversé par une dérivation de l'ammoniac entre D et le réservoir intermédiaire R. La détente de cet ammoniac en E refroidit l'eau de B, employée ensuite à l'alimentation F des mouleaux A, en même temps que le gaz qui achève de se liquéfier en *r* sous une pression plus basse que s'il se liquéfiait en D seulement (G R).

(1) En effet, depuis, les expériences de Munich ont démontré une infériorité de rendement de 20 à 38 °/₀ de la machine Pictet nouveau système comparativement à la machine Linde, et l'inventeur, M. Pictet, en a abandonné la construction. (D) avril 1890.

tombe sous le coup de nos considérations sur la suppression du graissage et cela à un très haut degré, car l'adjonction de l'acide carbonique élève la surchauffe à des températures très élevées.

Il nous reste un dernier point à considérer, au sujet duquel de nombreuses constructions ont surgi c'est la surchauffe pendant la compression : Comme nous l'a expliqué si bien M. Richard, d'après le théorème de Carnot, *il est nécessaire de rapprocher le plus possible les températures extrêmes du cycle*, c'est-à-dire, de ne pas descendre dans le réfrigérant à une température plus basse que celle qui est strictement nécessaire, et de ne pas surchauffer à la compression ; or, *toutes* les machines, sauf quelques exceptions que je citerai, surchauffent plus ou moins ; on combat cette surchauffe par des enveloppes à circulation d'eau autour du cylindre et des clapets, par des tiges et pistons creux à circulation d'eau, et même par des refroidissements par circulation de vapeur venant du réfrigérant ; mais, quoi qu'on fasse, la surchauffe existe et augmente la force motrice nécessaire dans une très notable proportion ; on peut dire à priori *qu'une machine avec surchauffe est de beaucoup inférieure, comme rendement , à une machine sans surchauffe*. Quelques-uns ont essayé, par des mécanismes assez compliqués, à injecter du liquide dans le cylindre pendant la compression ; cette voie est évidemment la vraie, mais elle est compliquée et inutile, car la *machine Linde n'a pas de trace de surchauffe*, sans posséder pour cela le plus petit mécanisme spécial ; simplement par la façon de régler la soupape régulatrice en laissant circuler, en dehors de la vapeur, quelques gouttelettes de liquide entraînées mécaniquement. Par suite, cette machine n'a pas besoin de chemise à eau, de pistons creux, etc.: cela simplifie le compresseur et rend tous les organes plus accessibles ; en même temps le rendement est le plus élevé.

Après cet examen général, nous voyons immédiatement se simplifier la question que nous nous étions posée. Si nous résumons les divers résultats, voici ce que nous obtenons :

1° Toutes les *machines non graissées* intérieurement, quel que soit le corps volatil qu'elles emploient, ne peuvent pas aspirer à figurer dans un bon rang, car leur rendement est diminué, et leur entretien ne peut pas être considéré comme bon ;

2° Toutes les machines employant des *graissages exagérés* au moyen de *bains d'huile* diminuent leur rendement par les effets consécutifs de l'absorption et du dégagement du gaz sous la variation de pression, et par le remplissage des tuyaux d'une masse de mousse huileuse ; la diminution du rendement et la complication de l'appareil sont encore augmentées par la construction à simple effet qui n'a aucune raison d'être.

3° Toutes les machines employant des *huiles congelables* donnent lieu à des

chômages et à des démontages fréquents. L'intérieur des serpentins se tapisse d'une mousse pâteuse incompatible avec le but à atteindre. Elles peuvent parfois devenir dangereuses.

4° *Les liquides binaires*, et particulièrement le mélange d'acide sulfureux et d'acide carbonique, ne présentent pas l'avantage de la diminution de la force motrice qu'on leur a attribué à tort.

5° Toutes les *complications employées pour combattre la surchauffe*, telles que : chemises, pistons creux, couvercles creux, injections de liquide par distribution spéciale sont superflues, attendu qu'on peut atteindre le même but par le simple réglage de la machine.

En principe, toutes les machines avec surchauffe sont sensiblement inférieures à celles sans surchauffe.

Tout à coup nous reconnaissons notre chemin dans ce labyrinthe.

Que reste-t-il maintenant de ces centaines de propositions et de détails de construction ?

La simple pompe horizontale à double effet et à gaz simple, construite aussi exactement que possible de façon à réduire les espaces nuisibles à quelques dixièmes de millimètres, avec stuffing-box en deux parties, et chambre intermédiaire remplie d'huile incongelable et reliée à l'aspiration de la machine. — Pour des pressions exceptionnelles, la même pompe avec fonctionnement compound. Voilà l'idéal. Nous voyons, qu'en cherchant le meilleur, nous trouvons, comme toujours, le plus simple.

La définition donnée ci-dessus du type idéal du compresseur se rapporte principalement à la construction proprement dite. Il reste maintenant à dire quelques mots du corps intermédiaire employé.

M. Richard nous a déjà dit que l'éther sulfurique et plusieurs autres liquides peu volatils sont abandonnés aujourd'hui ; nous avons entendu également pourquoi on les a abandonnés : c'est parce qu'ils exigent des cylindres trop grands, produisant des machines encombrantes. Le développement historique des machines à compression nous indique très clairement la voie suivie : on a toujours abandonné le liquide moins volatil pour un liquide plus volatil, L'éther a fait place à l'acide sulfureux et au chlorure de méthyle ; puis est venu l'ammoniac et enfin l'acide carbonique.

L'éther étant abandonné, examinons de suite *l'acide sulfureux*; à son sujet, nous pouvons nous en tenir à l'appréciation de l'auteur même de ces machines qui, nous le savons, les a abandonnées aujourd'hui pour leur substituer des machines employant un liquide plus volatil. M. Pictet a dit textuellement qu'il faut employer des liquides à plus fortes pressions que l'acide sulfureux, et il a

choisi un mélange dont les pressions sont intermédiaires entre celles de l'acide sulfureux de l'ammoniac [1].

Je suppose, pour ma part, que ce liquide n'a été choisi que parce que l'ammoniac était déja pris. J'ai déjà dit ce que je pensais des liquides binaires et surtout du liquide Pictet ; mais, même en laissant cette question ouverte, ces appareils fonctionnent sans graissage et doivent, pour cette raison, être considérés comme inférieurs ; en outre, ils surchauffent énormément : autre raison d'infériorité notable. *L'ammoniac*, au contraire, se comporte très bien avec les huiles minérales : c'est là une supériorité incontestable, à laquelle vient s'ajouter l'avantage des plus petits cylindres, de la neutralité absolue vis-à-vis des métaux employés ; les pressions d'aspiration étant toujours supérieures à l'atmosphère, toute rentrée d'air, d'humidité et de corps étrangers est supprimée, et, par là, la sécurité augmentée. La supériorité de l'ammoniaque sur tous les autres corps volatils a été tellement reconnue, elle saute tellement aux yeux, que, depuis trois ou quatre ans, la machine à ammoniac fait l'objet des 9/10 de tous les brevets pris dans cette branche, et qu'un très grand nombre de constructeurs, voyant le succès de ces appareils, se sont outillés pour leur construction ; on pourrait certainement citer 30 à 40 usines ayant commencé cette construction depuis trois ou quatre ans seulement. Ce fait, qui est un fait pratique, confirme la supériorité de l'ammoniac plus que toute discussion théorique.

Reste enfin *l'acide carbonique*.

D'après la loi que nous avons citée tout à l'heure, l'acide carbonique devrait venir au premier rang ; j'avoue que, moi-même, j'étais, pendant des années, partisan de ce corps, que je croyais appelé à supplanter l'ammoniac. Mais, depuis qu'on a pu étudier de plus près les appareils à acide carbonique, je suis revenu de mon idée.

Pour m'expliquer, je prendrai un exemple sur les machines à vapeur.

MM. Sulzer frères ont fait certains essais de consommation de vapeur de leurs moteurs en variant les pressions de la chaudière. Eh bien, les moteurs en question augmentaient de rendement en augmentant la pression de vapeur de 4 à 8 kilogrammes environ ; mais, lorsque la pression s'élevait de 8 à 12 kilogrammes la consommation de vapeur augmentait régulièrement, et pourtant ces moteurs étaient construits de la façon la plus parfaite.

J'en conclus, qu'à partir d'une certaine limite de pression, les fuites des soupapes des pistons et les autres causes de mauvais rendement acquièrent une influence prépondérante; de même, et surtout, les espaces nuisibles.

Et je trouve que cette thèse peut s'appliquer immédiatement aux machines à acide carbonique, seulement à un degré beaucoup plus élevé. J'estime que les

(1) Nous avons déjà fait remarquer que M. Pictet a également abandonné son *nouveau* système à liquide binaire (liquide Pictet) depuis l'époque où ce mémoire fut présenté (D).

mêmes causes indiquées doivent diminuer le rendement de ces machines dans d'énormes proportions.

A cette première considération s'en ajoute une autre : M. Richard nous a dit que la chambre du stuffing-box est, dans les machines Reydt, reliée à un gazomètre pour éviter les fuites vers l'extérieur ; or, avec les pressions de 70 atmosphères qui règnent dans ces machines, il est évident que la fuite au gazomètre n'est pas accidentelle, mais régulière, et que la recompression de cette quantité de gaz de la pression atmosphérique à celle du condenseur représente une bonne fraction du travail total.

Enfin la troisième raison, qui ne permettra jamais aux machines à acide carbonique d'avoir un fort rendement, est une raison toute théorique, mathématique, et par conséquent hors de doute : elle provient de ce fait que la chaleur d'évaporation r de ce liquide est très faible, et sa chaleur de liquide q très forte ; or, comme le liquide passe de la température du condenseur (+ 15 à 20°) à celle du réfrigérant — 10° par exemple, ce liquide amène dans le réfrigérant une forte quantité de chaleur qui, pour l'acide carbonique, peut devenir plus forte même que le froid ensuite produit par l'évaporation. On peut calculer le rapport de la perte de travail causée par cette raison au travail total nécessaire, et on trouve, par exemple pour — 10° au réfrigérant et + 15° au condenseur, que ce rapport est, avec l'ammoniac égal à 0,088, et avec l'acide carbonique égal à 0,573.

Avec 25 degrés au condenseur, on trouve 0,133 pour l'ammoniac et 1,534 pour l'acide carbonique.

On voit que, dans le dernier cas, la chaleur amenée au réfrigérant est plus grande que le froid produit ; c'est pourquoi les constructeurs cherchent à abaisser la température du condenseur par des circulations de vapeurs froides, mais, évidemment, toujours au détriment du froid utile.

Enfin, quatrième raison, l'acide carbonique surchauffe énormément à la com pression. Toutes ces causes réunies donnent aux machines à acide carbonique un rendement tout à fait insignifiant.

Nous sommes donc autorisés à dire que la voie où se sont engagés des praticiens, c'est à dire le développement de la machine à compression d'ammoniac, est la bonne, et celle à qui appartient l'avenir.

Et nous pouvons compléter notre définition du compresseur idéal en ajoutant que c'est l'ammoniac qu'il doit employer.

Maintenant que, dans le nombre des machines à compression, nous sommes par venus à définir un type, il faudra comparer ce type aux autres systèmes de production du froid : l'air comprimé et l'absorption.

Pour faire utilement cette comparaison, il faudrait, pour ces deux autres classes de machines, également arriver à définir le type idéal. Je ne me reconnais pas la compétence pour le faire, mais je serais très heureux si les spécialistes ici présents

voulaient bien nous donner une définition de chaque type considéré comme le meilleur.

Une fois ces trois définitions bien établies, la question des machines à froid se trouvera singulièrement simplifiée, et il ne faudra plus beaucoup de temps pour reconnaître, entre trois types seulement, celui auquel appartient l'avenir.

M. Richard discute un peu cette question dans son savant mémoire ; il nous dit même que la lutte reste circonscrite entre les machines à affinité et celles à compression d'ammoniac, et que les machines à air froid restent réservées aux bateaux et à quelques applications, où le rendement joue un rôle secondaire.

Je suis absolument d'accord avec la première partie de cette conclusion, mais en désaccord complet avec la seconde partie. Je trouve d'abord que la question du rendement ne joue jamais un rôle secondaire ; cette considération est même la base de tout ce que j'ai eu l'honneur de vous dire jusqu'ici.

Je trouve que la question du rendement : de la *quantité de froid produit par cent kilogrammes de combustible, est précisément la question primordiale.* Or, sans entrer dans la théorie, en ne prenant pour base que les données indiquées par les constructeurs mêmes, il m'est difficile de comprendre qu'on puisse encore choisir une machine à air froid pour une application quelconque.

Comparons par exemple le prospectus de la maison Bell-Coleman au prospectus de la maison Linde, et prenons deux machines de production égale. Eh bien, la machine à air consomme, pour le même travail utile, de 5 à 6 fois la force motrice de la machine à ammoniac, et cela, de l'aveu même du constructeur.

Sur un voyage d'Australie en Europe, avec un appareil frigorifique de moyenne grandeur, cela fait une différence de consommation de 50 à 60 tonnes de combustible, qu'il faut non seulement payer, mais emporter au détriment de la charge utile.

Si, malgré cela, on a préféré jusqu'ici les machines à air, c'est simplement parce que le *type marin manquait pour les autres systèmes.* On ne pouvait pas, sur un bateau, monter séparément machine à vapeur, compresseur, condenseur réfrigérant et diverses pompes, et réunir tous ces appareils entre eux par des tuyaux ; une installation de ce genre aurait certainement donné de déplorables résultats, et on préférait, pour cette raison, une machine à air. Mais aujourd'hui le *type marin est créé pour la machine à compression* ; MM. Sulzer frères ont à l'Exposition une machine Linde de ce genre, et, à mon avis, c'est là la plus grande nouveauté et la manifestation la plus intéressante parmi les machines de cette spécialité. Cette machine porte sur un seul socle le moteur à vapeur et un compresseur compound.

Le socle contient à l'intérieur le condenseur, et il porte sur ses flancs d'un côté le condenseur à vapeur, de l'autre une pompe à eau puisant directement à la mer. Voilà donc une installation complète en une seule pièce, pouvant se placer n'importe où sur un vaisseau. Aussi cette machine a-t-elle inspiré le plus grand intérêt aux capitaines de navire et aux exportateurs de viande qui ont eu l'occasion de la voir ; immédiatement aussi, la compagnie de la White-Star-Line a commandé deux de ces appareils pour ses vaisseaux.

Il est certain, qu'une fois ce type créé, il n'y a plus de raison d'employer la machine à air froid ; et le terrain va maintenant lui manquer rapidement dans la seule application qui lui restait, le refroidissement des cales du navire.

Voilà donc notre question sur l'avenir des machines à froid encore plus circonscrite et réduite à la comparaison de deux systèmes, employant tous deux l'*ammoniac*.

Faut-il préférer l'affinité à la compression ?

Quelques essais semblent avoir donné des résultats heureux pour la machine à affinité ; mais la plupart des essais, ceux qui sont publiés dans tous leurs détails, et dont on peut poursuivre toutes les phases, ont donné des résultats tout opposés. Les seuls essais sérieux qui sont parvenus entièrement à la publicité sont ceux de l'Association polytechnique de Munich, faits par un certain nombre de professeurs, sous la direction même des constructeurs de ces appareils.

Ces essais, publiés pas le rapporteur de la commission, le professeur Schrœter, de l'École polytechnique de Munich, ont amené à séparer complètement les machines à affinité en un groupe spécial, distinct des machines à compression.

Je citerai la conclusion de ce rapport, et je termine avec cette citation mon exposé.

M. Schrœter dit textuellement :

« En remarquant expressément que les chiffres du tableau ne doivent pas « encore représenter le rang *définitif* des divers systèmes, on peut pourtant, « sans difficultés, en former certains groupes, séparés entre eux par de tels « intervalles qu'il est certainement permis d'en tirer un jugement général sur « leur valeur *relative*. Indubitablement, les machines à absorption forment un « groupe distinct, dans lequel se présentent divers degrés d'économie de produc- « tion ; mais ce *groupe*, même avec des améliorations considérables, est toujours « séparé des machines à compression par un intervalle tellement grand que « l'on reconnaît qu'il y a ici une différence fondée dans le système, et qui « sépare la meilleure machine par absorption de la machine par compression. « Cette différence est, en réalité, prouvée également par la théorie. »

Pour terminer, je tiens à répéter que je serais très heureux si une discussion prolongée nous amenait à examiner de plus près les diverses questions soulevées et à approfondir leur portée.

voulaient bien nous donner une définition de chaque type considéré comme le meilleur.

Une fois ces trois définitions bien établies, la question des machines à froid se trouvera singulièrement simplifiée, et il ne faudra plus beaucoup de temps pour reconnaître, entre trois types seulement, celui auquel appartient l'avenir.

M. Richard discute un peu cette question dans son savant mémoire ; il nous dit même que la lutte reste circonscrite entre les machines à affinité et celles à compression d'ammoniac, et que les machines à air froid restent réservées aux bateaux et à quelques applications, où le rendement joue un rôle secondaire.

Je suis absolument d'accord avec la première partie de cette conclusion, mais en désaccord complet avec la seconde partie. Je trouve d'abord que la question du rendement ne joue jamais un rôle secondaire ; cette considération est même la base de tout ce que j'ai eu l'honneur de vous dire jusqu'ici.

Je trouve que la question du rendement : de la *quantité de froid produit par cent kilogrammes de combustible, est précisément la question primordiale.* Or, sans entrer dans la théorie, en ne prenant pour base que les données indiquées par les constructeurs mêmes, il m'est difficile de comprendre qu'on puisse encore choisir une machine à air froid pour une application quelconque.

Comparons par exemple le prospectus de la maison Bell-Coleman au prospectus de la maison Linde, et prenons deux machines de production égale. Eh bien, la machine à air consomme, pour le même travail utile, de 5 à 6 fois la force motrice de la machine à ammoniac, et cela, de l'aveu même du constructeur.

Sur un voyage d'Australie en Europe, avec un appareil frigorifique de moyenne grandeur, cela fait une différence de consommation de 50 à 60 tonnes de combustible, qu'il faut non seulement payer, mais emporter au détriment de la charge utile.

Si, malgré cela, on a préféré jusqu'ici les machines à air, c'est simplement parce que le *type marin manquait pour les autres systèmes.* On ne pouvait pas, sur un bateau, monter séparément machine à vapeur, compresseur, condenseur réfrigérant et diverses pompes, et réunir tous ces appareils entre eux par des tuyaux ; une installation de ce genre aurait certainement donné de déplorables résultats, et on préférait, pour cette raison, une machine à air. Mais aujourd'hui le *type marin est créé pour la machine à compression* ; MM. Sulzer frères ont à l'Exposition une machine Linde de ce genre, et, à mon avis, c'est là la plus grande nouveauté et la manifestation la plus intéressante parmi les machines de cette spécialité. Cette machine porte sur un seul socle le moteur à vapeur et un compresseur compound.

Le socle contient à l'intérieur le condenseur, et il porte sur ses flancs d'un côté le condenseur à vapeur, de l'autre une pompe à eau puisant directement à la mer. Voilà donc une installation complète en une seule pièce, pouvant se placer n'importe où sur un vaisseau. Aussi cette machine a-t-elle inspiré le plus grand intérêt aux capitaines de navire et aux exportateurs de viande qui ont eu l'occasion de la voir ; immédiatement aussi, la compagnie de la White-Star-Line a commandé deux de ces appareils pour ses vaisseaux.

Il est certain, qu'une fois ce type créé, il n'y a plus de raison d'employer la machine à air froid ; et le terrain va maintenant lui manquer rapidement dans la seule application qui lui restait, le refroidissement des cales du navire.

Voilà donc notre question sur l'avenir des machines à froid encore plus circonscrite et réduite à la comparaison de deux systèmes, employant tous deux l'*ammoniac*.

Faut-il préférer l'affinité à la compression ?

Quelques essais semblent avoir donné des résultats heureux pour la machine à affinité ; mais la plupart des essais, ceux qui sont publiés dans tous leurs détails, et dont on peut poursuivre toutes les phases, ont donné des résultats tout opposés. Les seuls essais sérieux qui sont parvenus entièrement à la publicité sont ceux de l'Association polytechnique de Munich, faits par un certain nombre de professeurs, sous la direction même des constructeurs de ces appareils.

Ces essais, publiés pas le rapporteur de la commission, le professeur Schrœter, de l'École polytechnique de Munich, ont amené à séparer complètement les machines à affinité en un groupe spécial, distinct des machines à compression.

Je citerai la conclusion de ce rapport, et je termine avec cette citation mon exposé.

M. Schrœter dit textuellement :

« En remarquant expressément que les chiffres du tableau ne doivent pas « encore représenter le rang *définitif* des divers systèmes, on peut pourtant, « sans difficultés, en former certains groupes, séparés entre eux par de tels « intervalles qu'il est certainement permis d'en tirer un jugement général sur « leur valeur *relative*. Indubitablement, les machines à absorption forment un « groupe distinct, dans lequel se présentent divers degrés d'économie de produc- « tion ; mais ce *groupe*, même avec des améliorations considérables, est toujours « séparé des machines à compression par un intervalle tellement grand que « l'on reconnaît qu'il y a ici une différence fondée dans le système, et qui « sépare la meilleure machine par absorption de la machine par compression. « Cette différence est, en réalité, prouvée également par la théorie. »

Pour terminer, je tiens à répéter que je serais très heureux si une discussion prolongée nous amenait à examiner de plus près les diverses questions soulevées et à approfondir leur portée.

OBSERVATION DE M. HIRSCH

J'ai écouté avec le plus vif intérêt la remarquable discussion dont M. Diesel vient de nous donner lecture. Je me permettrai seulement d'appeler l'attention de la section sur un point qui me semble imparfaitement élucidé. Il s'agit des machines à gaz liquéfiables, et de l'état dans lequel se trouve ce gaz pendant la période de compression.

M. Diesel affirme que, dans toutes les machines de ce genre, la vapeur passe, pendant la compression, à l'état de surchauffe ; et il invoque à l'appui de cette thèse l'élévation de température qui se produit pendant la compression, et que, dans un grand nombre de machines, on combat à l'aide d'affusions d'eau froide. Cette preuve ne paraît pas absolument indiscutable : la compression amène naturellement un échauffement, mais cet échauffement peut fort bien coexister avec la saturation, et même avec la condensation partielle de la vapeur ; le résultat, à ce point de vue, est fonction à la fois de la densité et de la température. Même dans la compression adiabatique, il y a parfois condensation de la vapeur saturée : tel est le cas pour la vapeur d'éther sulfurique ; et même avec toutes les vapeurs, il suffit d'enlever une assez faible quantité de chaleur pour que la compression amène une condensation, et cela, malgré l'élévation de la température.

L'étude de ces phénomènes est un problème qui, en principe, se résout sans difficulté à l'aide des équations de la thermodynamique. Malheureusement cette solution rencontre, dans les applications, un obstacle sérieux : pour la plupart des vapeurs employées dans les machines à froid, on ne possède pas les constantes physiques nécessaires pour le calcul numérique des équations : les coefficients faisant défaut, il paraît difficile d'affirmer à l'avance que, dans telle ou telle circonstance, il y aura surchauffe ou condensation de la vapeur saturée pendant la compression.

RÉPONSE DE M. RICHARD

Avant de présenter quelques observations sur la remarquable communication de M. Diesel, je dois lui exprimer tous mes remerciements pour les éloges dont il a bien voulu honorer mon mémoire sur la production et les applications industrielles du froid ; mais je ne puis accepter ces éloges pour moi seul. J'ai eu, en effet, pour m'aider dans la rédaction de ce mémoire, de nombreux collaborateurs parmi les auteurs qui ont, avant moi, étudié cette question, et dans les ouvrages desquels j'ai puisé de précieux renseignements. Je citerai, entre autres : en France, le mémoire classique de M. *Ledoux* sur la théorie des machines frigorifiques à air et à gaz liquéfiés, le travail très important de M. *Armengaud* sur les machines à air, le livre de M. *Lezé* sur les machines à glace, et le cours de mécanique de M. *Haton de la Goupillière*, où ce maître éminent traite

la question des machines frigorifiques avec la méthode rigoureuse et l'inimitable clarté qui caractérisent son enseignement tout entier ; en Angleterre, les mémoires présentés aux Civil Engineers et aux Mechanical Engineers de Londres par MM. *Bell-Coleman*, *Kirk*, *Kilbourn* et *Lightfoot*; en Allemagne, en outre des ouvrages de MM. *Schroter* et *Alois Schwarz*, le traité à peine achevé et déjà classique de M. *Behrend*, qui devrait être entre les mains de toutes les personnes qui s'intéressent à la production industrielle du froid.

Le premier effet de la communication de M. Diesel a été de provoquer, comme vous venez de le voir, entre M. Hirsch et lui, entre le savant et le praticien, une discussion des plus intéressantes au sujet de l'un des points les plus inportants du fonctionnement des machines à gaz liquéfiés : le gaz se comporte-t-il, pendant sa compression, comme une vapeur saturée ou comme une vapeur surchauffée ? Et il est résulté de cette discussion, entre deux personnes aussi au courant que possible de la question, non pas la lumière, mais, tout au moins, le doute, tellement, qu'à la fin de la discussion, chacune des parties est tombée d'accord pour admettre qu'il était impossible de trancher définitivement la question dans un sens ou dans l'autre, faut de données scientifiquement établies sur les propriétés physiques des principaux gaz employés dans les machines frigorifiques.

De là l'utilité, presque la nécessité d'une étude méthodique approfondie, à la fois scientifique et industrielle de ces corps.

Mais cette étude ne pourrait être entreprise que par des savants disposant de l'argent nécessaire pour établir des appareils de mesure, de l'habilité indispensable pour les concevoir et les manier, du temps très long qu'exigeraient ces recherches, et enfin d'un local où ils les poursuivraient à loisir. N'est-ce pas une nouvelle démonstration, ajoutée à tant d'autres, de la nécessité d'établir au plus tôt l'un de ces laboratoires industriels dont le Congrès a admis, dans sa dernière séance, l'incontestable utilité ?

Je proposerai en conséquence à l'approbation de votre Section, si M. le Président me le permet, le vœu suivant :

« Comme suite au vœu exprimé par le Congrès relativement à l'organisation « de laboratoires de mécanique, la 3e Section recommande en particulier l'insti- « tution de recherches expérimentales précises sur les propriétés physiques « des fluides usités dans les appareils à produire le froid. »

Abordons maintenant l'examen de quelques points de la communication de M. Diesel.

M. Diesel se déclara tout d'abord l'adversaire des *machines verticales* à bâtis distincts, et en particulier des machines à simple effet, dont il fait fort bien ressortir les défauts, mais sans mentionner deux de leurs avantages importants : la moindre fatigue, la non-ovalisation du cylindre qui n'a pas à supporter le poids

du piston, et, dans les machines à simple effet seulement, la moindre fatigue des stuffing-box, qui n'ont pas à supporter la pression de liquéfaction du gaz. Si le nombre des stuffing-box est doublé, leur fatigue est diminuée de plus de moitié, considération qui n'est pas à dédaigner, quelle que soit la perfection de leurs garnitures. Le fait est que, malgré leur prix d'achat plus élevé et leur encombrement plus volumineux, et bien que venues après que les compresseurs à double effet eurent reçu presque tous leurs perfectionnements actuels, les machines à simple effet se répandent de plus en plus : il suffit de rappeler les noms de MM. Lavergne, Kilbourn, Wood et Fixary. Or, il paraît bien difficile d'admettre qu'un dispositif plus cher et plus encombrant remplace ainsi souvent un mécanisme moins cher et plus compact en ne présentant sur ce dernier que des inconvénients. Je ne prétends pas trancher la question en faveur des machines à simple effet, mais je pense qu'il serait aussi plus prudent de ne pas la trancher, même en s'appuyant sur l'autorité de M. Diesel, exclusivement en faveur des compresseurs à double effet.

En ce qui concerne la suppression de l'espace nuisible par le maintien d'une couche d'huile au-dessus du piston des machines à simple effet, M. Diesel pense que, loin de supprimer l'espace nuisible, cette couche d'huile l'augmente par sa transformation en une sorte de mousse ammoniacale. Cela serait parfaitement vrai si l'on avait la prétention de se servir indéfiniment de la même couche d'huile qui, d'ailleurs, ne tarderait pas à disparaître; mais on doit comprendre que l'on entend, lorsqu'on veut employer cette couche d'huile, la renouveler suffisamment pour la maintenir toujours fraîche, insuffisamment imprégnée de gaz pour se transformer en mousse. Dans certaines machines, ce renouvellement s'opère d'une façon modérée, par un graisseur que l'expérience apprend bien vite à conduire ; dans d'autres machines, celles de Kilbourn et de Lavergne notamment, il s'effectue avec une surabondance peut-être un peu trop libérale, mais qui s'oppose certainement à la formation de la mousse.

Le *joint pâteux des machines Fixary* a eu le malheur de rencontrer en M. Diesel un redoutable adversaire : il va jusqu'à nier son existence, tout en l'accusant, s'il existait par hasard, des méfaits les plus noirs. Je vais tâcher de dissiper ces préventions, tout en vous avouant que je me trouve, en cette occasion, un peu embarrassé, car la société que je dirige construit des machines Fixary et le bureau d'organisation du Congrès n'a certainement pas eu l'intention de me fournir, en m'honorant de la fonction de rapporteur, l'occasion de vous présenter, à tort ou à raison, la machine Fixary et son joint pâteux comme la plus parfaite des machines à froid. Je n'ai pas d'ailleurs la prétention d'indiquer le joint de M. Fixary comme le seul qui puisse empêcher les fuites ; la disposition de M. Tellier remplit parfaitement cette condition ; mais je pense, je suis même

certain que notre joint pâteux est absolument imperméable, et cela, avec un moindre serrage des garnitures, un frottement moins élevé. Je dis que j'en suis certain parce que j'ai constaté maintes fois, sur des machines Fixary à double effet, qu'il suffit de supprimer l'action de ce joint pour que l'huile, puis du gaz ammoniac sortent de la garniture, absolument imperméable auparavant. Nous ne pouvons pas spécifier à quel état de congélation ou de viscosité se trouve l'huile de ce joint, mais son efficacité, entendue comme je viens de la définir, est incontestable. Nous pouvons même aller plus loin, et vous signaler une observation tendant à démontrer que l'huile du joint pâteux n'est pas complètement liquide, même autour de la tige du piston : cette tige est, en effet, absolument sèche au sortir de la garniture ; on peut souvent y frotter une feuille de papier sans la graisser : c'est une constatation que je viens de répéter en présence de M. Hirsch, sur la machine Fixary installée au frigorifère de l'esplanade des Invalides.

Quand à l'objection tirée de l'obligation d'employer pour le joint pâteux de l'huile congelable, susceptible de se répandre dans les serpentins du bac à glace et de les engorger par sa congélation, je ferai remarquer qu'il n'est pas *nécessaire* d'employer pour le graissage général de la machine, l'huile même qui circule plus ou moins dans le joint pâteux, et que, si nous n'agissons pas ainsi, c'est que nous avons constaté l'innocuité complète de l'emploi, tant pour le joint que pour le graissage général, d'une l'huile lourde, congelable vers — 20°. Cette huile se trouve, en effet, presque complètement enlevée à l'ammoniac, dès sa sortie des compresseurs, par un séparateur d'huile, constitué sur le principe des antiprimeurs des chaudières à vapeur, et qui ne laisse arriver aux serpentins du réfrigérant que des traces d'huile négligeables en pratique. Cette séparation de l'huile s'opère d'ailleurs très bien, par des procédés analogues, dans les machines de Lavergne, de Wood, de Kilbourn, etc., où le graissage très abondant conduirait sans cela à une obstruction rapide des serpentins.

L'objection à l'emploi de l'*acide carbonique* tirée de la chaleur élevée de son liquide, aurait besoin, pour porter avec toute l'importance que lui attribue M. Diesel, de la confirmation expérimentale des chiffres cités par lui, et qui paraissent en contradiction complète avec les résultats affirmés par M. Windhausen. Ici encore, ce serait au laboratoire industriel de trancher la question.

Je ne puis m'empêcher de trouver M. Diesel un peu sévère à l'égard des *machines à affinités*. Je sais bien qu'elles ont été condamnées par les expériences de Munich, qui les ont accusées d'un rendement trois fois moindre environ que celui des bonnes machines à compression ; mais il n'est pas bien certain que ces expériences soient sans appel. D'autres expériences, exécutées en France et en Amérique, les contredisent sur bien des points. Il y aurait lieu, pensons-nous,

de comparer et de discuter les résultats de ces différentes expériences avant de considérer la sentence des juges de Munich comme tout à fait définitive.

Le jugement prononcé par M. Diesel contre l'emploi *des machines à air*, même sur les navires, me parut aussi quelque peu prématuré. La principale objection des armateurs à l'emploi des machines à gaz liquéfiés sur les navires est, en effet, l'élément d'insécurité ou de risque introduit dans leur fonctionnement par leur dépendance d'un approvisionnement limité d'un produit chimique : une fausse manœuvre, un accident suffisent pour perdre la charge d'une machine, et le maniement de ces gaz exige des ouvriers spéciaux, dont la maladie peut compromettre par quelques jours d'arrêt le sort d'une cargaison infiniment plus précieuse que le combustible perdu par suite du moindre rendement des machines à air. Ces appréhensions, peut-être exagérées mais très légitimes au fond, empêcheront sans doute l'emploi des machines à gaz liquéfiés à bord des navires tant qu'elles ne les auront pas dissipées par quelques applications heureuses et prolongées. Nous souhaitons que la machine de M. Linde remporte ce succès : elle ouvrirait ainsi aux machines à gaz liquéfiés une nouvelle voie, ce dont nous ne pourrions que féliciter M. Linde et son éminent constructeur, M. Sulzer ; mais nous pensons néanmoins qu'il conviendrait de rester, jusqu'au succès final, dans une certaine réserve à ce sujet.

Ces quelques observations faites, il ne me reste plus qu'à remercier, pour mon compte personnel, M. Diesel des renseignements qu'il a bien voulu nous fournir dans son intéressante communication, où l'on rencontre à chaque pas la marque d'un praticien émérite, élevé à l'école de M. Linde, l'un des ingénieurs les plus éminents en matière de machines à froid.

Légende des Planches

Planche 1-2. — *Machine à air de Windhausen.*

A compresseur-détendeur séparé en deux parties par une gorge isolante *c*.

B long piston creux, rempli de matière non conductrice, aspirant l'air par le clapet *b*, et le refoulant, par a_1 au travers du tuyau J_1 et des tubes du refroidisseur F, qui l'amènent, par J, à l'aspiration a_1 du détendeur. L'air froid et détendu est refoulé, par la soupape b_1 partie au refroidisseur F, au travers du tuyau J_2, partie au bac à glace, par le tuyau J_3, puis du bac à glace au refroidisseur, par le tuyau J_3. Enfin, ces deux parties de l'air froid reviennent à l'aspiration *b* du compresseur par le tuyau J_4.

F refroidisseur de l'air comprimé divisé, par la chambre tubulaire F_1 en deux parties $_1F_2$ F_3, refroidies : la première par la circulation d'eau même qui qui rafraichit le compresseur, et la seconde par l'air froid amené directement du détendeur, par J_2, et du bac à glace par J_3. Les proportions d'air admises au refroidisseur F par J_2 et par J_3 sont réglées par la manœuvre du robinet *p*.

H bac à glace avec chicanes en bois H_3, destinées à uniformiser la distribution de l'air froid sur les mouleaux. *r*, poche en caoutchouc régularisant la pression de l'air dans le bac à glace, R, renifflard laissant penétrer de l'air extérieur filtré dans le bac, dès que la pression s'y abaisse, malgré la poche *r*.

Planche 3-4. — *Machine à ammoniac de Kilbourn.*

AA, soupapes d'aspiration avec *dash-pot*, et soutenues par un étrier (fig. 4). B, soupape de refoulement.

L'ammoniac refoulé par BD, le robinet V et le tuyau F, au condenseur M, s'en échappe par le tuyau H et le robinet de détente W, au réfrigérant E, pour revenir à l'aspiration C du compresseur par le tuyau N et le robinet d'isolement U.

P, tuyau amenant l'eau de circulation par QQ au condenseur, d'où elle s'échappe par R et par S, au réfrigérant qui l'amène glacée en O'. G, agitateurs : un pour le condenseur, un pour le réfrigerant.

Planche 5-6. — *Machine à glace Fixary*, type vertical de 50 kilogs à l'heure.

A, pompe ou compresseur à deux cylindres à simple effet. — B, condenseur avec serpentin de condensation. — C, récipient à ammoniac liquifié. — D, récipient à huile. — E, réfrigérant ou congélateur. — F, robinet s'isolement du congélateur. — G, robinet isolant le condenseur. — H, robinet de réglage. — I, séparateur d'huile. — L, robinet isolent le récipient. — M, robinet isolant le récipient C du séparateur d'huile. — N, robinet de communication. — O, robinet de chargement. — P, bouchon de purge d'air. — Q, robinet distributeur d'huile. — R, robinet de réglage du joint congelé ou joint pâteux. — S, soupape d'équilibre. — T, bouchon de nettoyage.

Planche 7-8. — *Exemple d'une installation frigorifique de Brasserie* (Cirier-Pavard à St-Germain).

Une machine à ammoniac Fixary, horizontale, à double effet, du type de 500 kilogrammes de glace à l'heure, fonctionne sur un réfrigérant qui alimente, avec une petite fabrication de glace, deux circulations : une circulation de liquide incongelable, qui refroidit les caves de réserve par des serpentins disposés aux plafonds des caves, et une circulation d'eau glacée, qui refroidit les cuves de fermentation, en passant par des refroidisseurs à double fond immergés dans ces cuves.

Planches 9 à 14. — *Installation d'une fabrication de 2,000 kilogrammes de glace transparente à l'heure, procédé Fixary-Stoppani* (Société des glaces pures à Paris).

A, machines à vapeur Farcot. — B, compresseurs à ammoniac Fixary. — C, condenseurs. — D, égoutteur séparateur d'huile. — E, récipient à ammoniac. — F, réfrigérants. — G, chariot roulant de relevage des mouleaux. — H, bac à eau chaude. — I, bac refroidisseur de l'eau épurée. — J, plan incliné pour le démoulage des blocs de glace. — K, crémaillères d'avancement des mouleaux. — L, épurateur de vapeur. — M, condenseur de vapeur. — N, refroidisseur. — O, filtre. — P, pompes à air. — Q, pompes alimentaires. — R, accumulateurs. — S, pompe centrifuge. — T, transmission principale. — U, transmission intermédiaire commandant les pompes à air. — V, transmission de commande du chariot roulant. — X, transmission de commande des agitateurs. — Y, puits et pompes d'alimentation d'eau. — Z, conduite d'eau au réservoir d'alimentation. — *a*, arrivée d'ammoniac aux réfrigérants. — *b*, robinets de détente. — *c*, aspiration dans les réfrigérants. — *d*, aspiration des compresseurs dans le bac refroidisseur. — *e*, refoulement des compresseur aux séparateurs d'huile. — *f*, refoulement des séparateurs d'huile aux condenseurs. — *g* refoulement des condenseurs aux récipients à ammoniac. — *h*, échappement de vapeur à l'épurateur. — *i*, conduite de vapeur

épurée au condenseur de vapeur. — j, commmunication du condenseur au refroidisseur. — *k*, conduite d'eau condensée au filtre. — *l*, amenée d'eau filtrée aux pompes alimentaires. — *m*, refoulement des pompes alimentaires aux accumulateurs. — *n*, amenée d'eau des accumulateurs au bac refroidisseur. — *n'*, arrivée d'eau de source de l'épurateur Howatson. — *o*, appareils du remplissage des mouleaux. — *p*, aspiration d'air. — *q*, refoulement d'air. — *r*, conduite d'eau du refroidisseur aux condenseurs. — *r'*, conduite du refroidisseur allant aux condenseurs à ammoniac. — *s*, trop-plein des condenseurs allant à la pompe centrifuge. — *s'*, arrivée du trop-plein des condenseurs à ammoniac. — *t*, conduite d'eau de la pompe aux condenseurs de vapeur.— *u*, tuyau de trop-plein.

Planche 15. — *Frigorifère Fixary de 5000 calories, à trois compartiments avec chambre de conservation des viandes*. (Exposition de 1889.)

A, Chambre froide ou de conservation de 50 mètres cubes. — *d*, Ventilateur aspirant l'air du haut de la chambre, par la conduite B, et l'y refoulant, au travers des compartiments *ccc* du frigorifère, par les conduites C C, disposées latéralement et pourvues de nombreuses trappes de réglage. — *b*, Machine à glace Fixary de 50 kilogrammes a l'heure, type vertical. — *a*, Moteur à gaz Otto de 6 chevaux.

Planche 16. — *Frigorifère Chambers des Victoria Docks* (p. 279).

D D D D, Compresseurs verticaux à simple effet au gaz ammoniac, vitesse 100 tours par minute. — E B, E B, Machines à vapeur compound de 30 chevaux. — C C, Pompe à air. — A A, Pompe de circulation.

Planches 17, 18. — *Frigorifère Fixary*, maison de conservation ou entrepôt frigorifique de *Crefeld*, p. 294.

a, Machine à vapeur. — *b*, Compresseurs Fixary à double effet de 100.000 calories chacun, dont un de rechange. — *c*, Réservoir d'huile. — *d*, Condenseur d'ammoniac. — *e*, Récipient pour l'huile et l'ammoniac liquéfié. — *f*, bac à glace de 375 kilogrammes à l'heure. — *g*, Bac de démoulage. — *h*, Plan de vidange des mouleaux. — *i*, Bac d'alimentation des mouleaux. — *k*, Grue roulante du service des mouleaux — *l*, Chemin de roulement de la grue. — *m*, Frigorifère Fixary de 60.000 calories. — *n*, Conduite d'air froid. — *o*, Conduite d'air chaud. — *p*, Conduite d'air frais. — *q*, Conduite d'air vicié. — *r*, Ventilateur du frigorifère. — *s*, Appareil de distillation pour fabrique de gaz ammoniac en parlant de l'ammoniaque du commerce.— *t*, Pompe alimentaire à main.— *u*, Pompe centrifuge d'alimentation d'eau, etc. — *v*, Réservoir de distribution d'eau. — *w*, Transmission. — *x*, Manomètre. — *y*, Puits.

Planches 19, 20. — *Frigorifère Fixary*, installation de Kalk, (p. 264).

a, Compresseur à double effet, type horizontal. — *b*, réservoir d'huile. — *e*, condenseur d'ammoniac. — *d*, Récipient d'huile et d'ammoniac liquéfié. — *e*, Frigorifère Fixary à quatre compartiments. — *f*, Ventilateur du frigorifère. — *g*, conduite d'air froid. — *h*, Conduite d'air chaud. — *i*, Conduite d'air frais. — *k*, Sortie de l'air vicié. — *l*, Appareil à distiller l'ammoniac. — *m*, Pompe d'alimentation à la main. — *o*, Réservoir. — *p*, Transmission. — *q*, Manomètre. — *r*, Cheminée. — *s*, Locomobile. — *n*, Pompe centrifuge de circulation d'eau.

Planches 21-22. — *Frigorifère et machine à glace Fixary*. Installation de la Compagnie frigorifique portugaise, (p. 292).

M M, Machines motrices. — C C, Chaudières. — *p p*, Compresseurs Fixary de 100.000 calories à double effet. — C C, Condenseurs. — G G, Bacs à glace transparente. — A, Accumulateurs. — V R, Condenseur et refroidisseur de la vapeur condensée (p. 253).— E, Frigorifère Fixary.— N, Ventilateur.— W W .chambres froides.— *a*, Conduites d'aspiration.— *r*, Conduites de refoulement de l'airrefroidi.

Planches 23-24. — *Frigorifère Fixary*. Installation des Halles de Bruxelles.

A, Machine motrice. — B, Compresseur Fixary à double effet de 100.000 calories. — *b*, Refoulement de l'ammoniac aux condenseurs C C — *a*, Aspiration de l'ammoniac détendu revenant du bac à glace E et du frigorifère Y au compresseur. — *f*, Echappement des machines à vapeur : cette vapeur débarrassée de sa graisse dans l'épurateur de vapeur I, se condense en J: M, pompe à air, K, refroidisseur de l'eau condensée. — L, Filtre d'où l'eau condensée, froide et purifiée, est reprise par la pompe N, qui la refoule, par le tuyau *j*, dans un accumulateur, d'où elle passe, par *h*, au réservoir refroidisseur *s*, du service des mouleaux ; ce réservoir est traversé par le retour *a* de l'ammoniac au compresseur dans un faisceau tubulaire. — E, Bac à glace recevant l'ammoniac liquide par le tuyau *e*, avec treuil roulant F et avancement des mouleaux U, bac et câble de démontage G et H, turbine agitatrice *a*.— Y, Frigorifère Fixary avec ventilateur X, aspirant l'air des chambres froides en *l*, et le refoulant refroidi par *m*..., *d d*..., robinets de détente du frigorifère.— Z, Chaudières.— V, Réservoir de distribution d'eau. — R R, Transmissions.

NOTE

SUR UNE

Disposition de Machine à Glace

PAR

M. B. LEBRUN

Tous les ingénieurs qui ont été conduits à étudier la construction des machines à glace se sont heurtés à une très grande difficulté : celle d'établir des garnitures étanches pour les tiges des pistons des compresseurs. Le plus grand nombre des dispositions proposées ont eu pour but de résoudre ce problème, et des deux savantes communications faites au Congrès par M. G. Richard et par M. Diesel, ainsi que de la discussion qui les a suivies, il résulte que c'est toujours là le point délicat des machines frigorifiques construites jusqu'à ce jour. Le mouvement alternatif des tiges des pistons rend leur usure inégale, plus considérable au milieu de la course qu'aux extrémités, et cette usure inégale rend inefficaces les dispositions proposées.

Il y a deux ans et demi, lorsque des circonstances particulières m'amenèrent à m'occuper de la construction des machines à glace, l'étude que je dus faire tout d'abord des divers systèmes les plus connus me conduisit de suite à chercher une solution de cette question des garnitures des presse-étoupe, et je crois intéresser le Congrès en lui donnant la description de la disposition à laquelle je me suis arrêté.

Ayant d'abord fixé mon choix sur l'ammoniaque anhydre comme agent frigorifique, j'ai combiné un compresseur dans lequel il n'y a plus de mouvement alternatif *extérieur* des tiges des pistons, et où je n'ai plus qu'un seul presse-étoupe placé sur un arbre animé d'un mouvement rotatif et n'ayant plus à s'opposer qu'à l'échappement de l'huile dans laquelle cet arbre tourne, huile qui n'est elle-même soumise qu'à la pression d'aspiration de la machine. soit 1 à 2 kilogrammes.

épurée au condenseur de vapeur. — j, communication du condenseur au refroidisseur. — *k*, conduite d'eau condensée au filtre. — *l*, amenée d'eau filtrée aux pompes alimentaires. — *m*, refoulement des pompes alimentaires aux accumulateurs. — *n*, amenée d'eau des accumulateurs au bac refroidisseur. — *n'*, arrivée d'eau de source de l'épurateur Howatson. — *o*, appareils du remplissage des mouleaux. — *p*, aspiration d'air. — *q*, refoulement d'air. — *r*, conduite d'eau du refroidisseur aux condenseurs. — *r'*, conduite du refroidisseur allant aux condenseurs à ammoniac. — *s*, trop-plein des condenseurs allant à la pompe centrifuge. — *s'*, arrivée du trop-plein des condenseurs à ammoniac. — *t*, conduite d'eau de la pompe aux condenseurs de vapeur.— *u*, tuyau de trop-plein.

Planche 15. — *Frigorifère Fixary de 5000 calories, à trois compartiments avec chambre de conservation des viandes*. (Exposition de 1889.)

A, Chambre froide ou de conservation de 50 mètres cubes. — *d*, Ventilateur aspirant l'air du haut de la chambre, par la conduite B, et l'y refoulant, au travers des compartiments *ccc* du frigorifère, par les conduites C C, disposées latéralement et pourvues de nombreuses trappes de réglage. — *b*, Machine à glace Fixary de 50 kilogrammes a l'heure, type vertical. — *a*, Moteur à gaz Otto de 6 chevaux.

Planche 16. — *Frigorifère Chambers des Victoria Docks* (p. 279).

D D D D, Compresseurs verticaux à simple effet au gaz ammoniac, vitesse 100 tours par minute. — E B, E B, Machines à vapeur compound de 30 chevaux. — C C, Pompe à air. — A A, Pompe de circulation.

Planches 17, 18. — *Frigorifère Fixary*, maison de conservation ou entrepôt frigorifique de *Crefeld*, p. 294.

a, Machine à vapeur. — *b*, Compresseurs Fixary à double effet de 100.000 calories chacun, dont un de rechange. — *c*, Réservoir d'huile. — *d*, Condenseur d'ammoniac. — *e*, Récipient pour l'huile et l'ammoniac liquéfié. — *f*, bac à glace de 375 kilogrammes à l'heure. — *g*, Bac de démoulage. — *h*, Plan de vidange des mouleaux. — *i*, Bac d'alimentation des mouleaux. — *k*, Grue roulante du service des mouleaux — *l*, Chemin de roulement de la grue. — *m*, Frigorifère Fixary de 60.000 calories. — *n*, Conduite d'air froid. — *o*, Conduite d'air chaud. — *p*, Conduite d'air frais. — *q*, Conduite d'air vicié. — *r*, Ventilateur du frigorifère. — *s*, Appareil de distillation pour fabrique de gaz ammoniac en parlant de l'ammoniaque du commerce.— *t*, Pompe alimentaire à main.— *u*, Pompe centrifuge d'alimentation d'eau, etc. — *v*, Réservoir de distribution d'eau. — *w*, Transmission. — *x*, Manomètre. — *y*, Puits.

Planches 19, 20. — *Frigorifère Fixary*, installation de Kalk, (p. 264).

a, Compresseur à double effet, type horizontal. — *b*, réservoir d'huile. — *c*, condenseur d'ammoniac. — *d*, Récipient d'huile et d'ammoniac liquéfié. — *e*, Frigorifère Fixary à quatre compartiments. — *f*, Ventilateur du frigorifère. — *g*, conduite d'air froid. — *h*, Conduite d'air chaud. — *i*, Conduite d'air frais. — *k*, Sortie de l'air vicié. — *l*, Appareil à distiller l'ammoniac. — *m*, Pompe d'alimentation à la main. — *o*, Réservoir. — *p*, Transmission. — *q*, Manomètre. — *r*, Cheminée. — *s*, Locomobile. — *n*, Pompe centrifuge de circulation d'eau.

Planches 21-22. — *Frigorifère et machine à glace Fixary*. Installation de la Compagnie frigorifique portugaise, (p. 292).

M M, Machines motrices. — C C, Chaudières. — *p p*, Compresseurs Fixary de 100.000 calories à double effet. — C C, Condenseurs. — G G, Bacs à glace transparente. — A, Accumulateurs. — V R, Condenseur et refroidisseur de la vapeur condensée (p. 253).— E, Frigorifère Fixary.—N, Ventilateur.— W W .chambres froides.— *a*, Conduites d'aspiration.— *r*, Conduites de refoulement de l'airrefroidi.

Planches 23-24. — *Frigorifère Fixary*. Installation des Halles de Bruxelles.

A, Machine motrice. — B, Compresseur Fixary à double effet de 100.000 calories. — *b*, Refoulement de l'ammoniac aux condenseurs C C — *a*, Aspiration de l'ammoniac détendu revenant du bac à glace E et du frigorifère Y au compresseur. — *f*, Echappement des machines à vapeur : cette vapeur débarrassée de sa graisse dans l'épurateur de vapeur I, se condense en J: M, pompe à air, K, refroidisseur de l'eau condensée. — L, Filtre d'où l'eau condensée, froide et purifiée, est reprise par la pompe N, qui la refoule, par le tuyau *j*, dans un accumulateur, d'où elle passe, par *h*, au réservoir refroidisseur *s*, du service des mouleaux ; ce réservoir est traversé par le retour *a* de l'ammoniac au compresseur dans un faisceau tubulaire. — E, Bac à glace recevant l'ammoniac liquide par le tuyau *e*, avec treuil roulant F et avancement des mouleaux U, bac et câble de démontage G et H, turbine agitatrice *a*.— Y, Frigorifère Fixary avec ventilateur X, aspirant l'air des chambres froides en *l*, et le refoulant refroidi par *m*..., *d d*..., robinets de détente du frigorifère.— Z, Chaudières.— V, Réservoir de distribution d'eau. — R R, Transmissions.

NOTE

SUR UNE

Disposition de Machine à Glace

PAR

M. B. LEBRUN

Tous les ingénieurs qui ont été conduits à étudier la construction des machines à glace se sont heurtés à une très grande difficulté : celle d'établir des garnitures étanches pour les tiges des pistons des compresseurs. Le plus grand nombre des dispositions proposées ont eu pour but de résoudre ce problème, et des deux savantes communications faites au Congrès par M. G. Richard et par M. Diesel, ainsi que de la discussion qui les a suivies, il résulte que c'est toujours là le point délicat des machines frigorifiques construites jusqu'à ce jour. Le mouvement alternatif des tiges des pistons rend leur usure inégale, plus considérable au milieu de la course qu'aux extrémités, et cette usure inégale rend inefficaces les dispositions proposées.

Il y a deux ans et demi, lorsque des circonstances particulières m'amenèrent à m'occuper de la construction des machines à glace, l'étude que je dus faire tout d'abord des divers systèmes les plus connus me conduisit de suite à chercher une solution de cette question des garnitures des presse-étoupe, et je crois intéresser le Congrès en lui donnant la description de la disposition à laquelle je me suis arrêté.

Ayant d'abord fixé mon choix sur l'ammoniaque anhydre comme agent frigorifique, j'ai combiné un compresseur dans lequel il n'y a plus de mouvement alternatif *extérieur* des tiges des pistons, et où je n'ai plus qu'un seul presse-étoupe placé sur un arbre animé d'un mouvement rotatif et n'ayant plus à s'opposer qu'à l'échappement de l'huile dans laquelle cet arbre tourne, huile qui n'est elle-même soumise qu'à la pression d'aspiration de la machine. soit 1 à 2 kilogrammes.

Les figures 1 et 2 donnent deux coupes perpendiculaires l'une à l'autre, et dans le sens vertical, de ma pompe de compression.

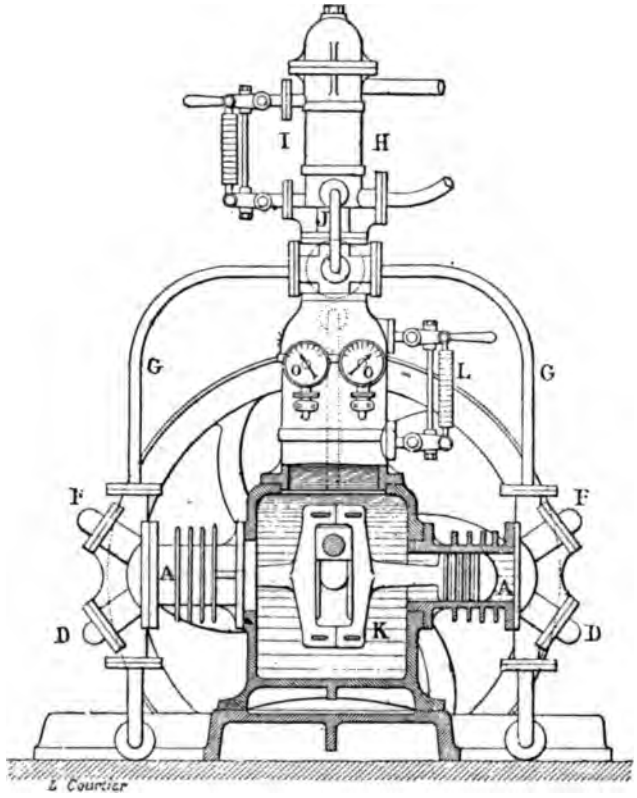


FIG. 1.

Le compresseur se compose de deux corps de pompe A à simple effet montés dans le prolongement l'un de l'autre, et séparés par un récipient K formant bâti; ce récipient est surmonté d'une cloche O. Les deux pistons sont réunis par leurs tiges à un cadre dans lequel glissent dans le sens vertical les coussinets d'un arbre coudé. Cet arbre coudé, commandé extérieurement au bâti K par des poulies ou par le moteur, traverse une boîte à garniture *m* et commande le cadre et les pistons auxquels il donne un mouvement alternatif.

Ce genre de commande a déjà été appliqué à diverses machines, mais il n'a pas donné de bons résultats alors que le cadre était moteur et l'arbre coudé récepteur. Il n'en est pas de même dans le cas présent où l'arbre coudé est moteur et le cadre récepteur : la transmission se fait avec beaucoup de douceur et les deux pistons opposés forment un guide parfait.

Le récipient K et la cloche O qui le surmonte sont remplis d'huile jusqu'à la moitié de la hauteur de celle-ci ; toutes les pièces frottantes sont donc constam-

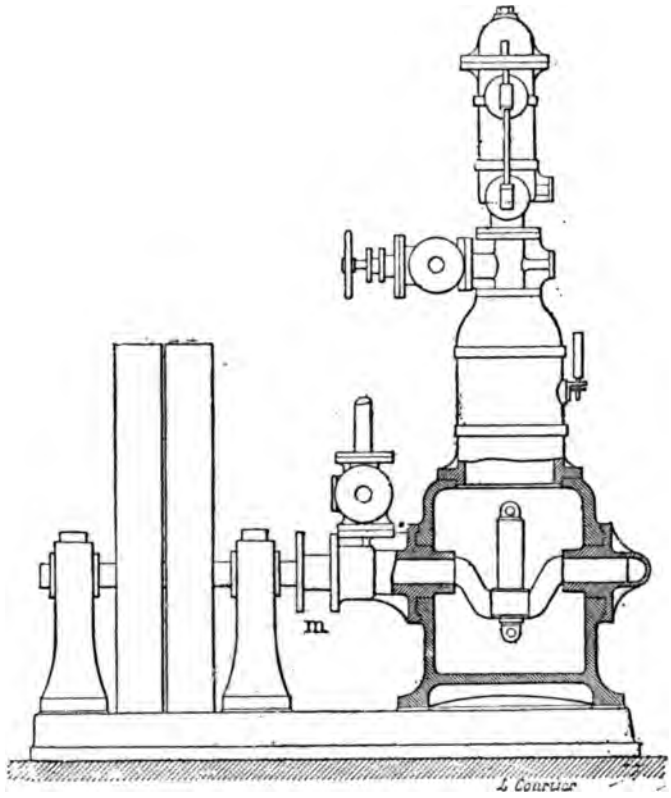


FIG. 2.

ment lubrifiées. L'huile qui peut passer par les fuites aux segments des pistons lors de l'aspiration, remplit les espaces nuisibles, rendant ainsi plus parfait le fonctionnement du compresseur ; elle se trouve alors entraînée avec l'ammoniaque comprimée et est recueillie dans un séparateur d'huile d'où on la renvoie de temps à autre dans la cloche O par simple aspiration. La cloche O communique par sa partie supérieure avec la tuyauterie d'aspiration des pompes, de telle sorte que l'ammoniaque qui a pu fuir aux pistons lors de la compression, se trouve aspirée de suite, et que la pression qui règne sur l'huile de la cloche et par suite sur le presse-étoupe *m* de l'arbre coudé, n'est jamais que celle de l'aspiration de la machine.

On m'a souvent objecté que tout le mouvement des pompes se trouvant renfermé dans le récipient K, il devait être très difficile de régler la glissière du cadre des pistons et de parer à l'usure des coussinets de l'arbre coudé : il n'y a

là aucune difficulté. Après avoir isolé le compresseur du restant de l'appareil frigorifique au moyen d'un robinet qui se trouve sur l'aspiration et d'un autre robinet qui se trouve sur le refoulement des pompes, on fait écouler l'huile que contiennent la cloche et le bâti, on ouvre les plaques des regards situés sur le bâti, et on fait au cadre et aux coussinets toutes les retouches nécessaires. Refermer les regards et remettre l'huile sont l'affaire de quelques instants, et le compresseur est de nouveau prêt à fonctionner. La perte d'ammoniaque est insignifiante, et bien des personnes devant qui nous avons fait cette opération, ont convenu qu'elle était plus simple, plus facile et même plus rapide que le rechargement des garnitures des autres compresseurs usités à mouvement alternatif extérieur. Si, d'autre part, on considère les précautions prises à la construction :

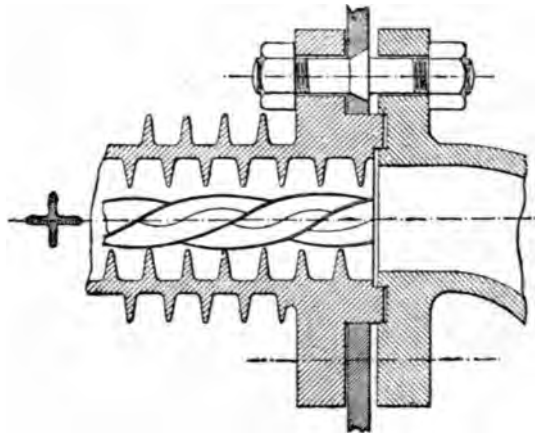


FIG. 3.

glissière et arbre en acier, coussinets en bronze phosphoreux, larges surfaces de frottement, et aussi en raison du graissage constant, on comprendra facilement qu'il est bien rarement nécessaire de toucher à la glissière et aux coussinets. Des machines très chargées ont fonctionné sans aucun arrêt pendant plus d'un an sans avoir eu besoin d'aucun serrage, et je ne crois pas qu'aucune garniture de presse-étoupe puisse tenir ce temps sans avoir besoin d'être refaite ou rechargée.

Les corps des pompes portent extérieurement des ailettes qui tout en leur donnant plus de solidité ont pour but de les refroidir. Grâce à la surface assez considérable de ces ailettes, j'ai pu supprimer complètement la circulation d'eau froide usitée dans tous les compresseurs pour parer à l'échauffement que produit la compression.

Nous avons d'ailleurs généralisé l'application des ailettes à toutes les parties de notre appareil frigorifique, et ainsi se trouve réalisée depuis bientôt trois ans l'application signalée comme peut-être possible par M. Richard (page 80, ligne 2 de son rapport), des tubes à ailerons ou à rondelles.

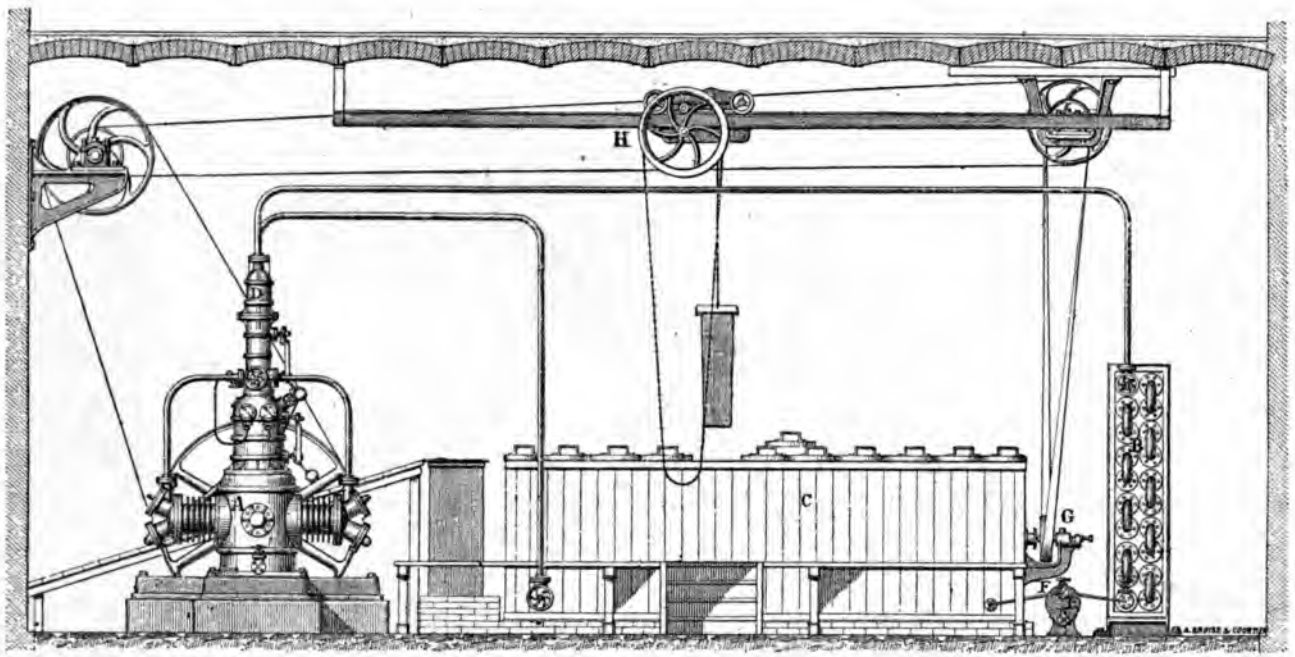


FIG. 4

En effet, le condenseur à ammoniaque se compose d'un nombre (variable suivant la force de la machine) de tuyaux en fonte avec ailettes en hélice intérieures et extérieures donnant une surface considérable sous un petit volume et formant un échangeur de température très puissant et très efficace. Ce sont des tubes semblables qui constituent le serpentin où se produit la détente de l'ammoniaque et qui est situé au fond de la cuve du congélateur contenant le bain d'eau salée. La figure 3 donne un tracé de ces tuyaux en fonte à ailettes.

La machine comporte encore bien des dispositions de détail, telles que niveaux d'huile et d'ammoniaque, réservoir d'ammoniaque anhydre, séparateurs d'huile, robinets, etc., etc., tous de construction spéciale, mais qu'il serait trop long de décrire ici.

J'ai voulu seulement appeler l'attention des membres du Congrès sur les dispositions spéciales du compresseur, et sur l'application des tuyaux à ailettes, dispositions signalées par les orateurs précédents comme des desiderata, alors que ces dispositions ont été brevetées par moi en France depuis plus de deux ans et ont été consacrées par plus de vingt applications importantes dès la première année de la construction industrielle de la machine.

Je joins encore ici un dessin, figure 4, qui donne l'ensemble d'une machine n° 4 produisant 25 000 calories négatives à l'heure, et disposées pour la fabrication de la glace.

QUATRIÈME QUESTION

TRANSMISSION A DISTANCE ET DISTRIBUTION DU TRAVAIL

par les procédés autres que l'électricité (eau, air, vapeur, câbles, etc.)

RAPPORT DE M. BOUDENOOT

INGÉNIEUR CIVIL DES MINES
MEMBRE DE LA SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS CIVILS

Le présent rapport a pour objet de passer en revue les divers systèmes de transmission et de distribution de travail, de retracer rapidement les diverses applications qui ont été faites de ces systèmes, d'en signaler les avantages et les inconvénients que l'expérience et la pratique ont pu faire ressortir, d'indiquer les conditions différentes dans lesquelles chacun d'eux a été mis en usage, et auxquelles l'un paraît pouvoir s'adapter de préférence à l'autre, et de mettre ainsi en lumière quelques points intéressants des diverses faces de la question.

Notre étude sera sommaire ; car, d'après le programme qui nous a été donné, nous avons moins à décrire les choses en détail qu'à les résumer. Nous remettrons donc le soin de développer ce rapport en l'une des séances du Congrès auquel nous présenterons un mémoire plus étendu, qui contiendra, notamment en ce qui concerne la distribution du travail au moyen de l'air raréfié, plus détaillées et plus complètes, les descriptions que nous ne ferons ici qu'indiquer brièvement.

Aujourd'hui nous devons surtout avoir pour but de provoquer de la part des membres du Congrès, auxquels ce rapport sera préalablement remis, des discussions utiles et fécondes sur les points de la question qu'ils voudront traiter, la production de faits et de documents nouveaux, enfin des communications qui porteront, soit sur l'ensemble du sujet et la comparaison des divers agents de transmission de force, soit sur l'un quelconque de ces agents, par une sorte de

monographie, si l'on peut ainsi parler, soit même sur un détail important, théorique ou pratique, de la question.

Notons tout de suite que, parmi ces agents, l'électricité n'est pas soumise à notre examen, parce qu'elle constitue, à elle seule, tout le programme d'un Congrès voisin du nôtre, du Congrès des électriciens, et que nous n'avons pas à parcourir le domaine naturellement réservé à nos collègues. Il nous sera toutefois permis d'en dire quelques mots ; mais nous n'en ferons pas l'objet d'un chapitre spécial et nous n'entrerons dans aucune description de transmission électrique.

Le texte même du sujet soumis à notre discussion indique qu'il y a, en quelque sorte, un double problème à étudier : la *transmission* du travail et sa *distribution*. Le premier nous paraît simple par rapport au second, qui serait plutôt complexe ; le second, en effet, comprend d'abord le premier ; car pour distribuer la force, il faut d'abord la transporter, mais il comporte encore quelque chose de plus, sa division en petites fractions.

Or, on peut très bien concevoir que tel procédé, excellent pour la transmission à distance, sera peu propre à la distribution en parcelles ; et que tel autre, éminemment propre à la distribution fractionnelle de la force, sera impuissant à transporter au loin l'énergie; et si le transport à grande distance ne s'allie pas facilement avec la division de la force, tandis qu'inversement la distribution divisée ne comporte pas le transport lointain, on conçoit qu'il y ait lieu, lorsqu'on doit à la fois transporter et distribuer la force, de ne pas trop étendre le cercle de distribution, puisqu'on distribue d'autant mieux qu'on transporte moins loin.

Nous soumettons ces considérations générales à la discussion, ainsi que les observations suivantes :

Dans les lignes qui précèdent, on s'est servi d'expressions diverses : *transmission du travail*, *transport de l'énergie*, *distribution de la force*. On peut, en outre, noter dans les ouvrages techniques des termes très divers, tels que :

Énergie actuelle ou *dynamique*, qui, pour les corps en mouvement, se traduit par l'expression $1/2mv^2$, qu'on appelle aussi *puissance vive* ou *demi-force vive*.

Énergie potentielle ou de *position*, qui s'applique aux corps en repos et qu'on nomme aussi *énergie latente*.

Mais, d'autre part, on voit appeler *énergie actuelle* ou *force vive* d'un moteur sa *puissance mécanique directe*, immédiate, et *énergie potentielle* ou *travail mécanique disponible* la puissance mécanique *transformée*, susceptible d'être transportée.

Rankine traduit *énergie* par *capacité pour accomplir un travail* ; Ayrton appelle *force* le *moyen* d'accomplir un *travail;* le premier définit l'*énergie*

actuelle par le *travail résistant* que le corps peut surmonter, et l'*énergie potentielle* par : le *produit d'une force* par le *chemin* qu'elle est capable de faire parcourir à son point d'application.

Au point de vue du rendement des transmissions de force, la terminologie n'est pas non plus bien fixe, et il arrive souvent que deux ingénieurs expriment le rendement de façons différentes. Reulaux a introduit récemment dans la mécanique les termes de *transmission linéaire* et de *transmission cyclique* ou *circulaire*, ainsi que la notion des *rendements* ou *effets spécifiques*, de la *valeur spécifique du transport à distance*, en faisant intervenir la détermination de la quantité de matière du corps chargé de la transmission.

N'est-il pas souhaitable de voir s'établir un peu d'ordre dans ces dénominations et ne serait-ce pas, au Congrès, une discussion intéressante que celle qui aboutirait à proposer une terminologie moins variable, un langage unique, fixe et déterminé ? On l'a fait pour l'électricité, et on le tente aussi, en ce qui concerne l'unification du cheval-vapeur et la spécification de la puissance des générateurs (1).

Abordons maintenant l'examen des divers agents de transmission du travail, en notant comment chacun d'eux peut se plier aux exigences de la distribution. L'ordre dans lequel nous les examinerons sera déterminé comme suit :

Les services que l'ingénieur, l'industriel, ou même les particuliers, peuvent réclamer au *travail* sont de trois sortes : on peut demander de la *lumière*, du *mouvement* ou de la *force proprement dite*, enfin de la *chaleur*.

Mettons en tête les agents de transmission qui peuvent fournir à la fois, d'une manière directe et immédiate, les trois marchandises susceptibles d'être demandées, puis ceux qui peuvent en donner deux, enfin ceux qui n'en peuvent fournir qu'une. Nous arrivons alors au tableau suivant :

NOMS des agents	GAZ	ÉLECTRICITÉ	VAPEUR ou eau surchauffée	EAU sous pression	AIR	CABLES
Marchandises fournies directement	Lumière .	Lumière .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
	Chaleur .	Chaleur(?)	Chaleur .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
	Force . .	Force . .	Force . .	Force . .	Force . .	Force . .

Si cet ordre marque, au point de vue théorique, général et abstrait, une certaine supériorité aux agents classés les premiers, il n'en faut pas conclure

1. Le Congrès est entré dans la voie que nous avons indiquée et a réalisé notre souhait en émettant, après discussion, un vœu tendant à préciser le langage de la mécanique (Voir le vœu, n° VI, *Listes des vœux formulés par le Congrès*) page 143 tome 1.

que cette supériorité existe pratiquement dans tous les cas qui peuvent se présenter.

La préférence à donner à tel ou tel système, dans un cas déterminé, dépend d'une foule de circonstances : d'abord, de la marchandise demandée ; n'a-t-on besoin que de force, ou en même temps de force et de lumière, ou à la fois de force, de lumière et de chaleur ? puis, de la facilité avec laquelle on peut se procurer, selon les temps ou selon les lieux, les divers agents de transmission, et de leur prix de revient ; ensuite de la quantité de force demandée ; enfin des exigences plus ou moins complexes de la transmission : est-ce un simple transport de force, d'un point à un autre, ou bien une distribution multiple ?

Cela posé, passons à l'examen successif des divers agents de transmission. Les deux premiers ne nous retiendront pas longtemps : les moteurs à gaz sont du domaine d'un rapport spécial, confié à l'éminent M. Hirsch ; l'électricité a son congrès particulier. Nous ne ferons donc que les mentionner en quelques lignes, à titre comparatif, parce qu'il n'est pas possible de les passer entièrement sous silence.

Gaz. — Cet agent transmet à distance la lumière, la chaleur et la force ; il le fait à des distances, sinon considérables, du moins relativement grandes ; il se prête aisément aux exigences de la distribution, à la division de la force en parcelles. Il présente, au point de vue économique, plus ou moins d'avantages, selon que le gaz est vendu cher ou bon marché ; et ce prix dépend lui-même de la proximité et de l'abondance des gisements de houilles à gaz, ainsi que du fait d'avoir à établir des canalisations ou d'en trouver de déjà établies.

Quant au mérite des moteurs à gaz comparés entre eux et aux autres machines thermiques, ce point sera traité de main de maître par M. Hirsch ; signalons seulement ici les avantages et inconvénients communs à tous. On peut, en général, les installer aisément et promptement ; leur mise en marche est rapide et simple ; leur entretien n'exige pas de surveillance spéciale ; la consommation du gaz s'arrête, quand le moteur ne marche pas, et se mesure facilement. Mais la combustion du gaz dégage de la chaleur, ce qui oblige à refroidir artificiellement au moyen de l'eau ou de surfaces rayonnantes ; elle donne naissance à de mauvaises odeurs, à de petites détonations ; tous inconvénients qui seraient très sensibles chez les travailleurs en chambre habitant des logements étroits et parfois malsains ; les fuites de gaz peuvent faire craindre l'asphyxie ou l'incendie, etc.

Électricité. — Comme le gaz, dont elle est la redoutable rivale, l'électricité transmet la lumière, la force et la chaleur, bien que pour cette dernière marchandise, la livraison n'en soit pas encore pratique. Mais elle les transmet à de très

grandes distances, instantanément pour ainsi dire, sans déplacement appréciable de matière, et en grande quantité.

L'électricité paraît se présenter comme le meilleur agent de transport lointain de la force, et permettre de résoudre le problème de l'utilisation des forces naturelles. Arrivera-t-on aussi à résoudre prochainement par l'électricité le problème de la distribution du travail sous toutes ses formes et en fractions quelconques, dans des conditions d'économie, de pratique commerciale et surtout de sécurité qui permettront de mettre le procédé entre toutes les mains ?

Nous le souhaitons, car le jour où une distribution électrique fournira dans les usines, boutiques, établissements publics et privés, et dans les maisons particulières, les trois marchandises cherchées (chaleur, lumière, force), à un prix assez bas pour que les conditions de la vie soient plus faciles et meilleur marché on aura réalisé un merveilleux progrès, social autant qu'industriel.

Actuellement, les frais de production du courant électrique, la durée et le rendement des conducteurs à haute tension, la spécialité des moteurs électriques, la difficulté de compter la consommation, le danger qu'il peut y avoir pour le premier venu à manier cet agent délicat, constituent autant de points sur lesquels de notables progrès ont été faits depuis quelques années, mais où il y a encore beaucoup à faire,

Le congrès des électriciens traitera de ces questions.

Vapeur. — Nous arrivons ici aux agents de transmission que nous devons examiner moins sommairement ; et nous notons tout d'abord que la vapeur ne nous fournit pas de lumière, mais seulement la chaleur et la force. Citons immédiatement des faits.

C'est à New-York que fonctionne la plus importante distribution de vapeur, destinée à la fois au chauffage et à la force. Des essais, qui avaient assez bien réussi, à Lockport et Buffalo, ont engagé les Américains à mettre ce système en usage dans leurs grandes villes du Nord. Toutefois ils n'ont pas le monopole de cette idée, puisque M. J. Chrétien, en 1868, a réalisé, en France, une distribution de vapeur sur un réseau de 1 500 mètres.

La station centrale actuellement en activité à New-York (on se propose d'en créer neuf autres) comporte une force totale de 16 000 chevaux. L'emplacement occupé a 23 mètres de largeur sur 36 mètres de longueur : les générateurs sont disposés en quatre batteries établies à des étages superposés ayant chacun 6 mètres de hauteur. Chaque batterie comporte 16 chaudières, de 250 chevaux chacune, placées sur deux rangs, avec les foyers en regard.

La canalisation comprend des conduites principales de divers diamètres (750 millimètres, 500, 380, 280), et des tuyaux de branchement plus petits, de $0^m,20$ à $0^m,08$). L'eau de condensation fait retour à l'usine centrale.

La pression moyenne de 5 kilogrammes est maintenue dans la canalisation principale ; les *régulateurs* ou *diffuseurs* permettent de fournir, dans les branchements, de la vapeur à 0 kil. 200 pour le chauffage.

Après avoir essayé toutes les formules connues pour déterminer les dimensions des conduites, on a conclu qu'elles étaient toutes aussi exactes (ou inexactes ?) l'une que l'autre. On a fait choix de la plus simple : $P = 87.3\ d^{\frac{5}{2}}$ dans laquelle P est le poids de la vapeur débité à l'heure, *d* le diamètre, en pouces, de la conduite. On simplifie encore, en remplaçant 87.3 par 100.

Pour faire payer leur consommation aux clients, on a d'abord pris pour base la quantité de charbon qu'ils brûlaient avant leur abonnement, puis on a essayé divers compteurs basés sur le principe de l'écoulement de la vapeur par un orifice de grandeur donnée avec une différence de pression connue. En maintenant constante, au moyen de soupapes mues par des pistons équilibrés, la différence de pression, on force la vapeur à s'écouler par des orifices dont la grandeur varie et s'enregistre sur un papier qui se déroule. De là un diagramme indiquant la consommation de vapeur. On a aussi imaginé d'autres méthodes dans lesquelles la vapeur est estimée non en volume et pression, mais en unités spéciales déterminées d'après des données empiriques, dont la base est le poids d'eau de condensation aux diverses pressions usitées. Les prix sont alors établis par mille unités.

Ces divers compteurs ne sont pas très satisfaisants ; car, dans un grand nombre de cas, la consommation se paye à forfait ; et, dans quelques-uns, on s'est contenté d'adapter à la machine un compteur de tours et d'estimer la dépense d'après le nombre de tours et les dimensions du cylindre.

Voici les avantages de la distribution de vapeur : elle se plie très bien aux exigences de la clientèle, mais elle ne peut effectuer le transport lointain. Le système est commode, salubre, sûr, facile à régler et à manier : il supprime, chez les abonnés, le combustible, la fumée, la cendre : il comporte une foule d'applications industrielles et domestiques ; il écarte toute cause d'incendie et donne même le moyen d'étouffer les incendies dus à d'autres causes. Aussi ses partisans ont-ils dit que, si l'éclairage de l'avenir se fera par l'électricité, le chauffage de l'avenir se fera par la vapeur ; et, dans leur pensée, l'usine de l'avenir qui distribuera chaleur, force et lumière fournira les deux premières marchandises par la vapeur et la troisième par l'électricité.

Cette solution ne me paraît pas probable, parce qu'elle exigerait une double canalisation et présenterait dès lors des difficultés d'autant plus sérieuses que c'est précisément dans la canalisation que réside le point faible de pareils projets.

Les inconvénients dus à la condensation de la vapeur dans les longs tuyaux et aux fuites qui se produisent dans les joints sont, en effet, assez considérables.

On a fait de nombreuses études sur les calorifuges et sur le métal des tuyaux,

de manière à diminuer, le plus possible, la quantité de vapeur condensée, on a expérimenté aussi diverses sortes de joints, à coulisse, à diaphragme, à brides, etc., de manière à diminuer les fuites, tout en assurant le jeu nécessaire pour la dilatation du métal des conduites.

On a même proposé d'abandonner les tuyaux métalliques pour des conduites ou petites galeries en ciment ; cette dernière substance étant mauvaise conductrice et ne se dilatant pas, on supprimerait les calorifuges et les compensateurs de dilatation.

Ces divers procédés ont pallié l'inconvénient en ce sens qu'ils ont diminué la perte de pression résultant de la condensation ; mais il faut toujours pourvoir à l'évacuation de l'eau ; et le nom de *boîtes à chagrin* donné aux purgeurs automatiques marque le peu de satisfaction que procure leur emploi. Enfin ce sont les fuites de vapeur, aux joints et aux robinets dont le nombre est considérable, qui se produisent encore malgré tous les soins pris pour les éviter et qui occasionnent le plus de perte, le plus de dépenses d'inspection et de réparation. Ajoutez à cela qu'elles provoquent des plaintes et des réclamations, parfois de longs et coûteux procès.

Eau surchauffée. — Ce procédé doit être directement rattaché au précédent, et non à l'eau sous pression, parce qu'il doit son efficacité à la vapeur latente dans le liquide et parce que les récepteurs, qui utilisent le système pour la force, sont des moteurs à vapeur.

C'est à Boston que s'est établie récemment une distribution d'eau surchauffée destinée au chauffage et à la force motrice.

A côté des chaudières de la station centrale, où l'eau est surchauffée, sont disposées des pompes qui aspirent l'eau chaude, la refoulent dans les conduites de distribution et en assurent ainsi la circulation dans cette conduite alimentaire qui revient à la chaudière. Une autre conduite, dite *de retour*, recueille sur tout le parcours l'eau qui a servi aux clients et qui s'est refroidie, et la ramène à la station centrale, où une pompe la renvoie aux chaudières dans lesquelles elle est chauffée à nouveau pour alimenter la distribution.

Des tuyaux de branchement se détachent, toutes les trois maisons, de la conduite principale pour aboutir à une boîte de distribution et se terminer par un chapeau à trois tubulures munies chacune d'un robinet. Ce robinet commande la conduite intérieure desservant une maison. Une disposition inverse analogue recueille l'eau refroidie dans la conduite de retour. Les tuyaux de branchement sont de 25 millimètres pour l'alimentation et de 50 millimètres pour le retour ; à partir du robinet de branchement, les conduites intérieures ont un diamètre qui varie de 6 millimètres pour les maisons ordinaires jusqu'à 12 millimètres pour les magasins et 18 millimètres pour les ateliers de plus de 20 chevaux. Ces conduites intérieures sont en cuivre, métal facile à courber sans joints.

Les deux conduites principales sont placées dans une tranchée de $0^m,80$ de large sur $1^m,20$ de profondeur en moyenne. De distance en distance sont disposés des massifs sur lesquels reposent des pièces de fonte munies de rouleaux qui portent les tuyaux de la conduite alimentaire et laissent un jeu suffisant pour la dilatation. Une chape recouvre en ces points la conduite et maintient les tuyaux dans leur position.

La conduite de retour est disposée de même au-dessous de la conduite alimentaire.

Cette dernière a un diamètre de $0^m,10$ et l'autre un diamètre double. On a adopté ces dimensions parce que, pour l'eau chaude, il est très important de diminuer la surface rayonnante et peu important d'augmenter le frottement que les pompes de la station surmontent facilement en donnant à l'eau une vitesse moyenne de 2 mètres par seconde; tandis que, pour l'eau froide, il importe de diminuer le frottement afin de faciliter l'écoulement qui se produit surtout en vertu de la pesanteur.

Dans les changements de direction, les joints sont à coulisse et compensateurs, placés dans des trous d'homme et d'un accès facile.

Des soupapes d'arrêt disposées de 30 en 30 mètres se ferment automatiquement en cas de rupture des conduites et ne laissent échapper dans la tranchée que l'eau comprise entre deux soupapes successives.

Ces dispositions très ingénieuses ont été imaginées pour assurer le bon établissement et le fonctionnement régulier de la canalisation ainsi que la pénétration chez les abonnés, et aussi pour garantir contre tout danger ou toute avarie provenant, en cas de fuite, de la pression de l'eau et de la vapeur. Les tuyaux subissent d'ailleurs 3 essais différents avant d'être mis en service. Pour diminuer la perte de chaleur par rayonnement, on a adapté un revêtement en fibres d'asbeste, de quatre centimètres d'épaisseur.

L'eau surchauffée, qui pénètre dans les immeubles, peut y être utilisée à toutes les opérations qui exigent une température ne dépassant pas 200°. Pour le chauffage, on emploie, dans les appartements, les *radiateurs* qui tiennent lieu de foyers, et où l'air froid vient se chauffer en circulant autour des tuyaux d'eau chaude.

S'il s'agit d'un établissement qu'on veut chauffer à la vapeur, on a recours aux *convertisseurs*, qui sont également employés quand on veut avoir de la force motrice.

Le convertisseur joue le rôle du dôme de vapeur des générateurs ordinaires. Il comporte une soupape de réduction qui supprime la pression et dégage la vapeur de l'eau, puis un manomètre et une soupape de sûreté, enfin une tubulure dirigeant la vapeur vers la conduite de chauffage ou vers le moteur. Dans ce dernier cas, on estime que le convertisseur doit avoir un volume décuple du cylin-

dre. En munissant le convertisseur de deux chambres et de deux soupapes de réduction, on distribue à la fois la force et le chauffage.

Ce système de distribution est assurément très ingénieux et semble *a priori* devoir rivaliser avec succès la transmission par la vapeur. Mais il ne fonctionne que depuis un an au plus, ce qui ne permet pas encore de se prononcer définitivement à cet égard.

D'après ce qui précède, on voit que l'important dans une distribution de vapeur ou d'eau surchauffée réside dans la canalisation et tous les organes accessoires qu'elle comporte ; ce sont les points qu'il serait intéressant de voir discuter au Congrès, ainsi que les mérites comparatifs de l'eau surchauffée et de la vapeur.

Eau sous pression. — L'emploi de la pression hydraulique, émanée d'une usine centrale, constitue un mode de distribution de la force qui, en certains cas, donne la meilleure solution du problème. Mais on ne peut ici fournir que de la *force*, pas de chaleur, comme en donnent aussi la vapeur et l'eau surchauffée ; encore moins de la lumière, comme en donnent en outre le gaz et l'électricité. Mais ni électricité, ni gaz, ni vapeur ne peuvent fournir, dans les mêmes conditions de sécurité et peut-être d'économie, une pression disponible de 50 kilogrammes par centimètre carré, que chacun peut aller prendre dans la rue bordant sa maison.

Dans les localités où l'on possède de fortes chutes d'eau, on peut maintenir à bon marché dans une conduite de l'eau à haute pression et distribuer à peu de frais la force à domicile. Ainsi sont répandus beaucoup de moteurs hydrauliques dans les villes et villages de la Suisse. Là, les moteurs *Schmidt* ont acquis une renommée universelle ; mais, comme tous les moteurs à cylindre, ils font une dépense constante, à moins qu'on n'y introduise une disposition compliquée ; et ce détail a conduit à essayer, pour le même usage, des petites turbines, dont on peut assez bien régler le débit au moyen de régulateurs assez simples (*Picard*).

Entre nombreux exemples, nous citerons la distribution de Genève, où l'on a établi deux canalisations systématiques, l'une à basse pression pour les usages ordinaires, l'autre à haute pression (10 à 12 atmosphères) pour la force.

Petits et peu encombrants, les moteurs hydrauliques fonctionnent sans bruit ; stables, faciles à installer, ils n'exigent guère de surveillance. On les met aisément en marche ; la consommation d'eau peut être réglée automatiquement pour les besoins du travail, et, d'une manière générale, ils se plient aux exigences d'une distribution visant les usages domestiques et les applications de la petite industrie.

Dans les localités où l'on n'a pas de chutes d'eau, mais seulement un fleuve ou un port, il faut avant tout, pour établir une distribution hydraulique, installer des machines à vapeur, des pompes, des élévateurs, des accumulateurs, et cela fait parfois hésiter. Cependant comme la machinerie hydraulique rend de grands

services dans les ports, sur les quais et dans les docks et magasins du voisinage, on a été naturellement amené à étendre la transmission de la force jusque dans la ville même.

Armstrong a le mérite d'avoir établi le premier des élévateurs hydrauliques tels qu'ils fonctionnent aujourd'hui ; mais on doit aussi lui attribuer l'application de l'eau sous pression à la distribution à domicile de la force ; car à Newcastle, avant 1853, il a fait fonctionner des moteurs d'imprimerie en se servant de la distribution d'eau de la ville.

Depuis lors, l'idée s'est développée en Angleterre, et c'est ainsi qu'à Hull et à Londres fonctionnent des distributions de forces hydrauliques.

A Hull, l'eau est fournie par la rivière et élevée, au moyen de pompes centrifuges, dans un grand réservoir qui forme en quelque sorte le toit de la station centrale, et dont la capacité est d'environ 400 mètres cubes. Au sortir du réservoir, où elle s'est déjà décantée, l'eau filtre à travers une couche de graviers avant de se rendre dans les conduites.

Les tuyaux d'aspiration et de refoulement sont maintenus constamment amorcés au moyen de valves et de syphons. Les pompes déversent sous l'accumulateur 70 mètres cubes d'eau par heure à la pression de 50 kilogrammes par centimètre carré.

La conduite amenant à l'usine l'eau de la rivière a un diamètre de $0^m,250$ et une longueur de 110 mètres environ. La principale conduite de distribution a un diamètre de $0^m,150$; elle repose sur un lit de béton dans une tranchée de $0^m,60$ de profondeur. De distance en distance, on a placé des valves de secours ou d'arrêt, et des tampons de lavage qui servent à nettoyer la canalisation et enlever les dépôts.

Les réparations à la conduite n'ont pas été trop nombreuses ; les coudes, bien que fréquents, n'ont pas diminué la résistance de la conduite ni augmenté beaucoup les pertes de charge que l'on évalue à 2 % par kilomètre.

Les tuyaux en fonte sont d'ailleurs essayés à une pression triple de celle à laquelle ils doivent travailler ; les joints sont faits avec soin, et les fuites sont aussi fort réduites ; elles se décèlent cependant aussitôt que produites, et peuvent vite être réparées.

Dans les grands froids, on chauffe légèrement l'eau de distribution, qui, d'autre part, grâce à sa haute pression, résiste mieux à la gelée que l'eau ordinaire.

Pour constater la consommation d'eau de la clientèle, on établit, à la suite du moteur ou du récepteur hydraulique, un compteur qui donne le volume d'eau au sortir de la machine.

A Londres, la station de distribution d'eau la plus importante est celle du pont de Blackfriars.

L'eau est puisée dans la Tamise et passe à travers un piston creux dont le

fond est en tôle percée de trous et recouverte de couches d'éponges qui donnent un filtrage convenable.

Les pompes sont mises en mouvement par des machines compound verticales, à condensation, comportant chacune un cylindre à haute pression et deux à basse pression.

L'eau fournie aux accumulateurs, qui sont au nombre de deux, est obtenue à une pression supérieure de 8 kilogrammes environ à celle de Hull, soit à 58 kilogrammes par centimètre carré.

Les conduites ont le même diamètre qu'à Hull ($0^m,150$). Elles sont disposées par secteurs circulaires; il en part quatre de l'usine; en divers points, des valves permettent d'isoler une section sans interrompre la distribution dans le reste du circuit.

Les appareils qui sont le plus fréquemment actionnés par ces distributions d'eau, sont des appareils de levage, des treuils, des cabestans, des grues, des broyeurs, des meules, des ascenseurs surtout, des outils d'imprimerie, de scieries, etc.

L'avantage des grues hydrauliques sur celles à bras est évident; les grues à vapeur même leur cèdent la place : on écarte ainsi les chances d'incendie, et on diminue les primes d'assurance.

Pour les appareils élévatoires, la machine hydraulique fournit une manœuvre simple, rapide, économique.

A côté des avantages généraux du système, il faut citer les inconvénients suivants : dépôts dans la canalisation; pertes de charge et fuites; difficulté et cherté d'installation des usines centrales; haute pression à donner aux liquides; par suite, au point de vue de la distribution des petites forces, difficulté d'établir de petits moteurs d'un parfait fonctionnement. Ce sont ces divers points, ainsi que les descriptions de moteurs hydrauliques nouveaux, qu'il serait utile de traiter au Congrès.

Air. — Comme l'eau sous pression et comme les câbles télédynamiques, l'air ne transmet que la force et non la chaleur et la lumière. Au lieu de chaleur c'est même du froid qu'il produit lorsqu'il se détend dans les machines réceptrices.

Il y a des distributions d'*air comprimé* et d'*air raréfié*. Dans les premières les machines réceptrices utilisent l'excès de la pression entretenue dans les conduites sur la pression atmosphérique; dans les secondes, l'excès de la pression atmosphérique sur la pression maintenue dans la canalisation de vide.

Comprimé ou raréfié, l'air est un agent de distribution de force qui, dans certaines circonstances, présente sur les autres procédés des avantages déterminés.

Avec lui, on n'a pas à se préoccuper du retour comme avec la vapeur, l'eau,

les câbles ou l'électricité; on n'a pas à s'inquiéter des différences de niveau et des coudes comme dans les conduites d'eau; de la chaleur, de la condensation et des fuites, comme dans les conduites de vapeur; de l'incandescence, des étincelles et de l'isolement imparfait, source de véritables dangers, comme dans les conducteurs électriques; des mouvements rapides et désordonnés, comme dans les câbles.

Si maintenant on les compare entre eux, on peut dire que les avantages de l'air comprimé sur l'air raréfié sont de permettre une plus forte puissance et une transmission plus éloignée : ceux de l'air raréfié sur l'air comprimé consistent dans un meilleur rendement, dans une simplicité et une économie plus grandes. Aussi, dans le cas d'une distribution de petites forces à domicile dans un rayon peu étendu, il y a lieu, selon nous, d'employer l'air raréfié, tandis que l'air comprimé est tout indiqué quand il s'agit d'une force moyenne à transmettre en un ou plusieurs points à une distance moyenne; et, dans les mines et tunnels, partout d'ailleurs où la question de rendement est négligeable ou secondaire, l'air comprimé rend d'utiles services.

Dans le cas d'une distribution à domicile, indépendamment de son faible rendement, l'air comprimé présente divers inconvénients. Le froid, dû à la détente de l'air, fait des moteurs à air comprimé de véritables machines à glace, et produit la congélation de la vapeur d'eau entraînée et des huiles de graissage : de là l'obligation de doubler chaque moteur à air d'un réchauffeur important.

Cet inconvénient ne se produit que d'une façon bien moins intense dans le moteurs à air raréfié; et l'on n'a pas non plus, dans le système du vide, à faire tout le long des conduites cette évacuation de l'eau que l'air comprimé entraîne en sortant des compresseurs, et qui exige l'emploi de robinets purgeurs, collecteurs, purgeurs automatiques. Avant d'entrer dans le moteur à air comprimé, le fluide doit encore traverser un régulateur de pression, afin de compenser les notables écarts qu'on constate dans la pression aux divers points de la conduite.

Pour ces divers motifs, ayant à étudier, en 1884, une distribution de force à domicile dans les quartiers de Paris, où la petite industrie est très condensée et n'exige que de faibles forces, l'auteur de ce rapport n'a pas hésité à approuver le projet conçu par M. *Petit*, promoteur du système pneumatique, dont l'idée remonte à *Papin* (*Acta eruditorum*, Lipsiæ, 1688), et à contribuer à la fondation de l'usine de la rue Beaubourg, qui distribue la force par l'air raréfié.

Outre sa simplicité, qui le rendait pratique et maniable pour tous, ce système nous paraissait comporter un autre avantage, celui d'être hygiénique et de renouveler l'air de la chambre de travail; et ce n'était pas à dédaigner dans un quartier populeux, où les logements sont peu sains et étroits.

Cependant, à Birmingham, on entreprenait à la même époque une distribution par l'air comprimé; et, deux ans après, en 1886, une entreprise analogue

était inaugurée à Paris par une compagnie parisienne, héritière et continuatrice de la Société des horloges pneumatiques, sous la direction de M. *V. Popp*.

Nous décrirons, au Congrès, les installations de l'usine de distribution de force motrice à domicile par l'air raréfié, dirigée par MM. *Petit* et *Boudenoot*, et celles de l'usine de la Compagnie parisienne d'air comprimé (*procédés V. Popp*), et nous nous bornons ici à dire un mot des applications courantes.

Celles des *moteurs à air raréfié* sont toutes du domaine de la petite industrie parisienne ; ils mettent en œuvre : des tours à percer et à roder, des outils à travailler le bois, le cuivre, l'ivoire, l'ébène, l'écaille, le celluloïde ; des scies circulaires et à rubans, des fraises, des laminoirs, etc. Ils sont répandus chez les bénistes, orfèvres, graveurs, bijoutiers, imprimeurs, rémouleurs, fabricants de peignes, de brosses, de boîtes à bonbons, de pendules de voyage, de manches d'ombrelles et d'écrans, qui habitent dans un rayon de 700 à 800 mètres autour de l'usine ; ils utilisent une force variant de 5 kilogrammètres à 3 chevaux.

Les applications de l'*air comprimé* sont, pour quelques-unes, les mêmes que les précédentes ; mais ce cas, d'ailleurs peu avantageux, est assez restreint, et la plupart des moteurs à air comprimé sont employés en vue de forces moyennes (presses, broyeurs, laminoirs, scies exigeant de 5 à 20 chevaux), et surtout chose bizarre, pour actionner des machines dynamos produisant l'éclairage électrique.

Toutefois, l'air comprimé ne peut être classé parmi les agents de transmission fournissant autre chose que de la force, parce que ce n'est pas directement mais indirectement qu'il donne de la lumière. Il ne fournit l'énergie électrique que par une nouvelle installation et une nouvelle transformation (air en électricité) de la force qui a déjà été transformée de vapeur en air.

Ces transformations successives, alors que l'une d'elles, la distribution d'air comprimé, est déjà d'un rendement très faible, constituent une solution absolument anti-économique et qui ne peut être qu'éphémère : c'est d'ailleurs ce qu'a fort bien compris la Société de la rue Saint-Fargeau, qui établit aujourd'hui des canalisations d'électricité en vue de la distribution directe de l'éclairage.

Câbles télédynamiques. — La transmission par câbles n'est qu'une extension de la transmission par courroies, qui est d'un emploi universel dans les usines.

Ce procédé ne peut fournir que de la force, comme les deux agents qui précèdent : air et eau ; et il est loin de se prêter, comme eux, à la distribution. Les câbles, en effet, ne peuvent convenir, pour transmettre au loin la force, que dans les campagnes, hors des villes, et surtout dans les pays de montagnes : là encore, la force transmise par eux ne peut être partiellement distribuée en route qu'en des points déterminés, aux arbres des stations de relais.

Mais quand on se trouve dans des conditions spéciales, comme c'est fréquemment le cas dans l'utilisation industrielle de la force d'une chute d'eau à 5 ou 6

kilomètres de distance, une transmission par câble bien étudiée permet le transport dans des conditions plus favorables que l'électricité ou tout autre agent de transmission.

M. F. Hirn, qui a inventé ce procédé de transmission, y est arrivé en partant de ce principe que « le travail économique est le produit d'un effort « exercé, ou d'une résistance surmontée par une force, par une vitesse ou un « espace parcouru par le point d'application de cette force, et, qu'en augmen- « tant la vitesse, on est maître de diminuer à volonté l'effort pour une même « somme de travail produit. »

Une poulie d'un grand diamètre, animée d'une grande vitesse, qui à l'aide d'un câble léger commande une seconde poulie, d'un diamètre à peu près égal, placée à une grande distance, voilà le système dans sa plus plus extrême simplicité.

On le pratique réduit ainsi à sa plus simple expression (une poulie conductrice et une poulie conduite reliées par le câble) quand la distance ne dépasse pas 150 mètres. Au delà, il faut établir des poulies de support intermédiaires, construites plus légèrement, parce qu'elles n'ont qu'à supporter le câble sans transmettre aucun effort.

Quand la distance est très grande, au lieu d'augmenter simplement le nombre des poulies de support, on subdivise la transmission en plusieurs relais, dont chacun a son câble propre. Les relais sont séparés par des stations. Chaque station porte un arbre avec deux poulies ou une poulie à deux gorges. Cette disposition permet de distribuer, au moyen des arbres des stations, une partie de la force transmise, et d'effectuer plus aisément les changements et réparations assez fréquents dans les câbles.

Pour les changements de direction, on les fait au moyen de poulies horizontales placées entre deux poulies de support ou bien au moyen de deux arbres faisant entre eux l'angle voulu, et reliés par un engrenage conique.

Les poulies de support et les stations sont établies sur des piliers en maçonnerie plus ou moins élevés.

Dans le cas d'une distribution partielle faite à chaque station, les relais ont des forces de moins en moins grandes à transmettre, et l'on peut réduire progressivement le diamètre des câbles et des poulies.

Les distributions de station consistent ordinairement en une livraison faite à un seul établissement, dont on arrive à constater empiriquement la consommation normale. On peut aussi concevoir que l'arbre de la station mette en mouvement un second arbre longeant plusieurs ateliers et distribuant la force à plusieurs preneurs. Mais il n'est pas aisé dans ce cas de calculer la consommation de chacun, ni de régler, d'une façon constante et régulière, les vitesses relatives des arbres spéciaux aux divers clients : aussi ces distributions ne sont guère pratiques.

Quant à la transmission seule de la force au moyen des câbles, il en a été

fait des milliers d'applications depuis l'invention qu'en a faite M. *F. Hirn* (transmissions à des usines, comme à Schaffouse, Oberwesel, Moscou et dans les filatures d'Alsace, labourage à vapeur, traction des véhicules sur les plans inclinés, tramways funiculaires, traction mécanique sur les canaux, etc.).

Les avantages des câbles télédynamiques consistent dans la simplicité du système et son bon rendement pour des distances relativement encore importantes. Les inconvénients sont : les allongements qui font obstacle à la régularité du mouvement ; les glissements, dont les effets fâcheux croissent avec ceux des allongements ; les frottements, l'usure rapide, les frais considérables de changement et d'entretien.

Aussi l'attention se porte-t-elle sur tous les moyens propres à diminuer ces inconvénients, et nous souhaitons de voir signaler à cet égard au Congrès quelque progrès nouveau.

Quelle sera la conclusion de ce rapport? Il suffit de le lire pour comprendre qu'il ne saurait en être tiré aucune conclusion absolue. Chaque agent de transmission pourra, suivant les cas, être préféré aux autres.

Si l'on veut, à la fois, force, lumière et chaleur, on ne pourra hésiter qu'entre le gaz et l'électricité. Si l'on n'a pas besoin de lumière, mais seulement de force et de chaleur, on pourra hésiter aussi entre la vapeur et l'eau surchauffée. Si l'on ne cherche que de la force, l'eau sous pression, l'air et les câbles entreront en lice, mais ces derniers en vue seulement de la transmission et non de la distribution.

L'air comprimé sera employé avantageusement pour la distribution de forces moyennes à des distances moyennes, jusqu'à plusieurs kilomètres, surtout dans les cas où l'on ne s'inquiète pas du rendement ; mais il est le plus coûteux des systèmes pour la transmission de la force à de petites distances ; l'eau sous pression offre, à cet égard, une solution plus économique ; et l'air raréfié se présente pour la distribution à domicile de petites forces dans un rayon peu étendu, dans des conditions excellentes au point de vue de la simplicité, de l'économie, de la commodité et de l'hygiène.

Quant au transport des forces naturelles à de très grandes distances, l'électricité n'a sans doute pas dit son dernier mot ; mais, en attendant, il est possible, au moyen des câbles télédynamiques, de transporter aux établissements industriels, dans des conditions relativement favorables, le travail de chutes d'eau éloignées déjà d'une dizaine de kilomètres.

NOTE

SUR LA

Distribution de force motrice à Genève

PAR

M. BUTTICAZ

INGÉNIEUR DU SERVICE DES EAUX ET DES FORCES MOTRICES DU RHÔNE

(Planches 25 à 32)

SERVICE DES EAUX DE LA VILLE DE GENÈVE EN 1872

C'est en 1872, sous les auspices de M. l'ingénieur Turrettini, directeur de la Société genevoise pour la fabrication d'instruments de physique, que les moteurs Schmidt furent introduits à Genève, pour donner aux industriels une force motrice à domicile en profitant de la distribution d'eau de la ville.

Genève possédait à ce moment là une usine hydraulique située au pont de la Machine, en tête de l'Ile.

La chute du Rhône était obtenue au moyen d'un barrage mobile à poutrelles horizontales.

Les machines installées consistaient :

1° En deux roues à aubes courbes, recevant l'eau en dessous et actionnant deux pompes à double effet à axe vertical. Elles avaient été établies dès 1838 par l'ingénieur Cordier de Béziers, puis modifiées par le général Dufour. La force de chacune était de 35 chevaux.

2° De la turbine Callon, à siphon, composée d'une roue hélice, d'une force de 60 chevaux.

3° De la turbine Roy, composée d'une roue hélice à axe horizontal d'une force de 80 chevaux actionnant au moyen d'engrenages coniques deux groupes de pompes, disposées comme les précédentes.

La force totale dont disposait le service des eaux était donc de 210 chevaux.

Des canalisations conduisaient en ville l'eau sous pression et un petit réservoir situé à l'Hôtel de Ville à environ 35 mètres au-dessus du lac servait de régulateur.

RÉSERVOIR DU BOIS DE LA BATIE EN 1873

L'installation de quelques moteurs réclama bientôt la construction d'un réservoir sur l'une des collines situées à proximité de la ville.

Ce réservoir fut construit en 1873, au bois de la Bâtie. Son plan d'eau moyen est à 420^{m},96 au-dessus de la mer, soit à 45^{m},96 au-dessus du niveau moyen du lac. Une conduite de 500 millimètres de diamètre le relie au réseau général de la ville. Sa capacité est de 4 800 mètres cubes.

MACHINES A VAPEUR 1879-1880

De nouvelles installations ne tardèrent pas à devenir nécessaires ; mais vu l'opposition de la part des cantons riverains, l'Administration ne jugea pas à propos de faire de nouveaux travaux sur le Rhône, pour augmenter la puissance de ses moteurs hydrauliques. Le 30 septembre 1879, le Conseil municipal vota es crédits nécessaires à l'établissement d'une usine à vapeur, et le 17 juillet 1880 eut lieu l'inauguration. L'installation consiste en deux machines à vapeur de 150 chevaux chaque, sortant de la maison Escher, Wyss et Cie, à Zürich, actionnant des pompes à deux cylindres et à piston plongeur du type Girard.

INSTALLATIONS NOUVELLES 1883-1889

Malgré cette augmentation de forces l'extension du service en exigea bientôt de plus considérables, et, un arrangement avec les riverains du lac étant sur le point d'intervenir, la ville de Genève se décida à réunir dans une seule usine toute la force disponible du Rhône comprise entre le lac et sa jonction avec l'Arve.

Cette force, évaluée à 6 000 chevaux, devait être obtenue en utilisant le bras gauche du fleuve comme canal industriel et le bras droit comme canal de décharge du lac lors des hautes eaux.

Après des études entreprises par M. l'ingénieur Turrettini, conseiller administratif de la ville de Genève, délégué aux travaux, et par M. Merle d'Aubigné, ingénieur, directeur du service des eaux, ainsi que par un certain nombre d'experts, les crédits nécessaires furent demandés et le 30 octobre 1883, le Conseil municipal votait les sommes que réclamait l'exécution de la première période des travaux de l'utilisation des forces motrices du Rhône.

Ces travaux comprenaient :

1° L'approfondissement du bras gauche du Rhône au moyen de terrassements à sec.

2° La démolition de l'ancien barrage du Pont de la Machine (bras gauche) et la reconstruction de la passerelle.

3° La construction d'une digue séparative en aval de l'Ile.

4° La construction de vannes de décharge entre l'Ile et la digue séparative.

5° La construction d'un égout collecteur le long du bras gauche du Rhône.

6° La construction d'un bâtiment des turbines à la Coulouvrenière. Le bâtiment devait pouvoir par suite d'agrandissement utiliser toute la force du Rhône, soit 6 000 chevaux.

Cette force serait captée par 20 turbines de 300 chevaux, donnant 70 % de rendement et mettant à disposition une force de 210 chevaux chacune.

Après examen, il fut décidé que la transmission de force se ferait au moyen de l'eau sous pression, en créant un nouveau réseau à 150 mètres de pression d'eau.

L'ancien réseau fut alimenté par deux groupes de pompes à 50 mètres de pression d'eau tandis que le nouveau réseau recevait l'eau fournie par trois groupes spéciaux.

Une soupape équilibrée permettait d'admettre facilement l'excédent d'eau du réseau à haute pression dans celui à basse pression.

Enfin, le réseau à haute pression ne possédant pas de réservoir à air libre on établit dans le bâtiment même, quatre grands réservoirs verticaux dans lesquels de l'air était comprimé à 150 mètres de pression, pour supporter les variations brusques qui pourraient se produire dans la consommation de l'eau de ce réseau.

Tous ces travaux, commencés immédiatement, après le vote du Conseil municipal du 30 octobre 1883, furent achevés en mai 1886. L'exécution des travaux situés dans le Rhône fût remise à MM. J. Chappuis et Cie et la maison Escher Wyss et Cie fut chargée de la construction des turbines et pompes.

En 1887 on installait encore un sixième groupe de pompes pouvant fonctionner à haute ou à basse pression.

Les turbines sont à réaction, système Jonval, à pivots supérieurs et vannages sur les distributeurs, chacune calculée pour :

1° Une chute de $3^m,70$ et un débit de 6000 litres par seconde.

2° Une chute de $1^m,68$ et un débit de 13 350 litres à la seconde, faisant dans les deux cas 210 chevaux de force effective.

La turbine est à distributeur à trois couronnes ; deux couronnes sont à vannages.

Le poids de l'appareil est d'environ 31 000 kilogrammes.

Chaque turbine actionne deux groupes de pompes horizontales accouplées à angle droit, avec un piston plongeur à double effet.

Le dernier type pouvant fonctionner à haute ou basse pression a un piston plongeur de 320 millimètres de diamètre et 1100 millimètres de course.

Les deux pompes fonctionnent en marche lente à haute pression de 135 mètres et en marche rapide à basse pression de 55 mètres.

Les deux gronpes réunis pèsent approximativement 45 000 kilogrammes.

Ces machines ont été fournies par la maison Escher, Wyss et Cie, Zurich.

Les installations se complétèrent en 1888 par l'établissement d'un réservoir à air libre pour le réseau à haute pression et de deux nouveaux groupes de pompes, n° 7 et 8 du dernier type.

Le réservoir étant situé à Bessinges soit à plus de 5 kilomètres du bâtiment des turbines, et n'étant relié à la ville que par une conduite de 600 millimètres de diamètre, une différence de pression assez importante existe chez les abonnés suivant que l'eau va au réservoir ou qu'elle en revient.

Pour donner au réseau de la ville une pression très sensiblement égale M. l'ingénieur Turrettini, conseiller administratif fit placer aux Eaux-Vives, à l'entrée de la ville une pompe centrifuge, actionnée par une turbine.

Le régulateur de la turbine est mis en mouvement par un servo-moteur actionné par un poids que supporte une tige de piston. Si la pression baisse (l'eau venant du réservoir) le poids fait descendre le piston hydraulique, l'ouverture du distributeur de la turbine a lieu et celle-ci se met en marche avec la pompe centrifuge qu'elle commande, refoulant ainsi l'eau du côté de la ville.

Si la pression est trop forte (l'eau montant au réservoir) le poids est soulevé par la pression hydraulique, le distributeur de la turbine se ferme, et l'eau sous pression n'agissant plus sur la turbine, celle-ci et la pompe sont libres de tourner en sens contraire sous l'action de l'eau passant dans les aubes de la pompe centrifuge pour monter au réservoir.

De cette façon la pression est suffisamment régulière pour que les abonnements de force motrice puissent être réglés à la jauge, c'est-à-dire d'après l'ouverture des distributeurs de turbines.

Si pour une raison quelconque le réservoir de Bessinges est momentanément mis hors de service, la régularisation de la pression se fait au bâtiment des turbines comme avant la mise en service de ce réservoir.

L'appareil de relèvement de pression des Eaux Vives, ne fonctionne donc pas pendant le temps où l'on visite le réservoir.

Par 24 heures la quantité d'eau élevée par les pompes est en 1889 :

Haute pression	60 000	mètres cubes	maximum
Basse »	39 000	»	
Haute pression	27 000	mètres cubes	minimum des Dimanches et fêtes
Basse »	25 000	»	

La force motrice est distribué jusqu'à 3000 mètres du bâtiment des turbines et l'eau d'alimentation jusqu'à 8 kilomètres.

MOTEURS SECONDAIRES

Les moteurs qui ont été installés au début de la livraison de la force à domicile, sont des moteurs Schmidt à colonne d'eau du type de la Société genevoise de construction d'instruments de physique.

L'effet utile est de 80 à 90 %. Pour une pression de 50 mètres d'eau, ils sont construits couramment de 1/16 de cheval à 4 chevaux et coûtent de 275 à 1790 francs.

Ils sont avantageux pour de petites forces ; pour des forces plus grandes on emploie, depuis 1883 des turbines à admissions tangentielles.

Depuis 1886, de bons régulateurs de vitesse ont été adoptés par les maisons Weibel, Briquet et Cie, à Genève (système Piccard) et Escher Wyss et Cie, à Zurich.

Ces régulateurs permettent d'actionner directement avec des turbines des dynamos pour l'éclairage électrique public ou particulier.

Ces dernières applications vont de 1 à 200 chevaux, et les turbines de grande puissance commandent une dynamo par chaque extrémité de leur arbre.

LIVRAISON DE L'EAU.

Avec les moteurs Schmidt, la livraison de l'eau se fait par un compteur de tours. Le volume du cylindre étant connu, on obtient par une simple multiplication la quantité d'eau dépensée.

Quant aux turbines, l'orifice du distributeur pouvant se régler, la force peut être livrée au cheval en réglant en conséquence l'orifice d'admission de l'eau sur la turbine.

Les compteurs d'eau pour les turbines sont des compteurs de volume placés, soit avant la turbine (type Michel, de Paris, à turbine), soit après (type Piccard, de la maison Weibel, Briquet et Cie, à Genève).

Ce dernier, de construction récente, est avantageux pour les gros débits, par le fait que, placé à la sortie de l'eau de la turbine, il n'a pas l'inconvénient de diminuer la pression disponible.

Les tarifs, avant 1886, étaient :

Pour 1 cheval,	par cheval	. . . .	1 200	francs.
» 2 chevaux,	»	. . . .	1 150	»
» 3 »	»	. . . .	1 100	»
» 4 »	»	. . . .	1 000	»

A partir de ce moment, la force n'est plus vendue qu'à moins de la moitié du coût de la force produite par une machine à vapeur, le combustible étant compté à raison de 32 francs la tonne.

RÉSUMÉ.

La distribution de force que nous venons d'examiner se fait donc simplement au moyen des conduites sous pression livrant indifféremment l'eau ménagère et l'eau motrice. -- La grande facilité de division de ce système rend la force motrice applicable à toutes les industries et à tous les emplacements; les Conseils de la Ville ont donc été bien inspirés en choisissant ce procédé, puisque, le beau résultat financier qui en est la preuve, provient du fait d'avoir pu retirer des installations pour eau ménagère un supplément de recette par la vente de la force motrice, représentant, en 1888, les 30 % de la recette totale soit plus de 150 000 francs, presque exactement le bénéfice annuel.

TARIF DE LA FORCE A FORFAIT

(par cheval et par an.)

NOMBRE de chevaux	NOMBRE D'HEURES DE MARCHE PAR JOUR		
	10 heures de marche	12 heures de marche	24 heures de marche
1	fr. 585.00	fr. 630.00	fr. 855.00
2	535.50	585.00	778.00
3	486.00	540.00	720.00
4	441.00	504.00	675.00
5	418.50	472.50	630.00
10	263.00	318.50	408.50
15	220.00	262.00	342.00
20	203.50	237.50	310.00
30	196.00	216.00	275.00
40	182.00	199.00	265.00
50	170.50	188.00	250.00
100	139.00	159.00	210.00
200	125.00	138.00	187.00
300	100.00	110.00	150.00

TARIF DE L'EAU MOTRICE A HAUTE PRESSION

livrée au compteur d'eau. — Pression maximum 140^{m} d'eau.

Consommation mensuelle

MÈTRES CUBES	PRIX du mètre cube	MÈTRES CUBES	PRIX du mètre cube
200 à 400	9.6	5000 à 6000	4.1
400 à 2000	8.0	6000 à 7000	3.7
2000 à 3000	7.2	7000 à 8000	3.4
3000 à 4000	5.6	8000 à 9000	3.1
4000 à 5000	4.7	etc., etc.	

jusqu'à deux centimes le mètre cube, prix minimum.

DÉTAIL DES CONDUITES

DIAMÈTRE EN MILLIMÈTRES	BASSE PRESSION	HAUTE PRESSION
700	m. —	m. 30
600	33.8	4269.50
500	2286.8	1665.50
400	—	4820 »
350	1294.3	466.80
300	124.0	2647.85
250	7449.9	3692.60
200	1611.6	5432.85
180	174.0	—
165	140.6	—
160	343.4	—
150	2849.5	4239.30
135	344.7	1837.50
120	3682.5	891.20
110	4939.5	875 »
100	5028.9	13273.50
90	43 »	3812.40
82	1417 8	—
80	23431.7	3110.80
75	578.9	5993.70
70	3802.8	—
65	949.2	—
60	8888.7	2927.85
55	1913.6	—
50	4088.5	9689.70
40	1716.9	4256 »
Totaux	78037.6	73931.65

Développement de la vente de la force motrice comparativement à l'ensemble de la vente de l'eau du service des eaux et forces motrices du Rhône.

ANNÉES	RECETTE TOTALE de la vente de l'eau y compris l'eau municipale par année.	AUGMENTATION annuelle	EAUX MOTRICES Produit annuel	EAUX MOTRICES Augmentation annuel	0/0 de la recette d'eau motrice comparée à l'ensemble des recettes	NOMBRE de moteurs	RECETTE par moteur	OBSERVATIONS
1871	133769.50	»	»	»	«	»	»	
1872	156194.25	22424.75	1127.70	»	0.7	10	112	
1873	180869.50	24675.25	10139.80	9012	5.6	21	482	Mise en service du réservoir du Bois de la Bâtie.
1874	206359.95	25490.45	18717.70	8578	8.8	42	445	
1875	221923.05	15563.10	27175.40	8458	12.2	48	566	
1876	240243.20	18320.15	31549.35	4374	13.1	62	508	
1877	224958.70	»	35809.35	4260	15·4	72	497	
1878	256006.80	31048.10	40225.70	4416	15.7	85	473	
1879	257346.30	1339.50	40460.25	235	15.3	104	389	
1880	274462.80	17116.50	48034.40	7574	17.5	111	432	Mise en service des Machines a Vapeur.
1881	304153.60	29690.80	46323. »	»	15.2	118	392	
1882	313692.55	9538.95	46643. »	320	14.8	123	379	
1883	321527. »	7834.45	50459. »	3816	15.6	129	391	
1884	336766.90	15239.90	48625. »	»	14.4	133	365	
1885	348800.40	12033.50	61116. »	12491	17.5	141	433	
1886	367120.75	18320.35	67659. »	6543	18 4	170	397	Mise en service de 5 g. de pompes
1887	453201.40	86080.65	107682. »	40023	23.7	192	560	id. du 6e g. id.
1888	515545.95	62344.55	150421. »	42739	29.1	220	683	id. des 7e et 8e id.

INDUSTRIES UTILISANT LES FORCES MOTRICES DU RHONE

au 31 décembre 1890.

GENRE D'INDUSTRIE	Basse pression		Heuta pression	
	Nombre de moteurs	Force en chevaux	Nombre de moteurs	Force en chevaux
Ameublements	2	4 »	»	» »
Abattoirs (app. frig.).	—	» »	2	30 »
Appareils électriques.	2	20 »	3	600 »
Articles en étain.	—	» »	1	1.30
Bandagistes.	2	2 »	»	» »
Bijoutiers.	3	10 »	1	1 »
Boulangers.	2	3.70	»	» »
Brasseries.	1	4 »	3	70 »
Buanderies.	1	6 »	»	» »
Bonneterie.	—	» »	1	1 »
Briqueterie.	—	» »	1	3 »
Blancs p' p. à mus.	—	» »	1	13.75
Cafés torrifiés.	1	» 50	1	2 »
Chapelier.	1	2 »	»	» »
Charcutiers.	6	6 »	»	» »
Charron.	1	5.70	»	» »
Confiseur.	1	4 »	»	» »
Cour^{ies} p. remontoirs.	1	2 »	1	10 »
Couteliers.	2	3 »	»	» 50
Coiffeur.	1	1 »	»	» »
Chocolatiers.	1	1 »	1	5 »
Dégrossissage d'or.	2	33.60	1	10 »
Dentiste.	1	3 20	1	» »
Doreurs-argenteurs.	1	1 »	»	» »
Diamantaires.	—	» »	1	21 »
Enseignements.	2	6 »	»	» »
Ecl. élec. n. pompes.	—	» »	1	8 »
Ecole d'horlogerie.	—	» »	1	1 »
Electriciens.	1	2 »	1	8 »
Fab' de cigares.	1	1 »	»	» »
— d'eaux gazeuses.	19	24 40	»	» »
— de biscuits.	1	2 50	»	» »
— de spiraux.	1	1 »	»	1 »
— de laine bois.	—	» »	1	6 »
— de chicorée.	—	» »	1	3 »
— de vis.	—	» »	1	9.50
— de clefs de montres.	1	1 »	»	» »
— d'aiguilles.	1	2 »	»	» »
— de cadrans.	1	1 »	»	» »
A reporter.....	63	156.60	26	808.05

GENRE D'INDUSTRIE	Basse pression		Haute pression	
	Nombre de moteurs	Force en chevaux	Nombre de moteurs	Force en chevaux
Report.....	73	156.60	26	808.05
Fab' d'appareils photogr.	1	2 »	»	» »
— de glace.	»	» »	1	10 »
— d'huiles.	1	3 »	»	» »
Ferblantiers.	4	11.15	2	9 »
Fondeurs.	1	4 »	1	4 »
Fraises pour horlogeries.	»	» »	»	» 25
Gainiers.	2	2 »	»	» »
Horlogers.	5	12 »	»	2 »
Imprimeurs.	14	28.60	1	5 »
Instrum. de physique.	»	» »	1	12 »
Lithographes.	7	7 »	»	» 50
Laminoir.	»	» »	1	2.50
Manufact. de tabacs.	1	2 »	»	» »
Marchands de bois.	13	35.05	2	3 »
— de grains.	1	3 »	»	» »
— de fers.	1	3 50	»	» »
— de vins.	1	1 »	»	» »
Mécaniciens.	4	12.50	6	21.50
Menuisiers.	2	1.30	1	52 »
Marbrerie.	»	» »	1	15 »
Monteur de boites.	»	» »	1	1 »
Moulin à farine.	»	» »	1	60 »
Perceur de joyaux.	1	» 25	»	» »
Pileurs.	2	9 »	1	1 »
Pharmacien.	1	1 »	»	» »
Poteries.	»	» »	2	20 »
Parqueterie.	»	» »	1	4 »
Phototypie.	»	» »	1	1.50
Pierristes.	1	2 »	4	7 »
Régleur.	1	» 25	»	» »
Robinetteries.	3	5.50	2	4 »
Restaurant (électr.).	»	» »	1	4 »
Serruriers.	1	1 »	2	4 »
Théâtre (ventilation).	6	12 »	»	» »
Tramways.	»	» »	1	7 »
Voituriers.	4	1 »	»	» »
Verre gravé.	»	» »	1	2 »
TOTAL.....	138	319 70	64	1056 3

Récapitulation :

	Moteurs Schmidt	Turbines	Total	Ascenseurs	Total
Réseau à basse press.	124	14	138	14	152
— à haute press.	1	63	64	2	66
	125	77	202	16	218

Comparaison avec les années précédentes

ANNÉE	Basse pression		Haute pression		Totaux	
	Nombre de moteurs	Force en chevaux	Nombre de moteurs	Force en chevaux	Nombre de moteurs	Force en chevaux
1883	85	163.65	—	—	85	163.65
1884	89	172.65	—	—	89	172.65
1885	95	188.85	—	—	95	188 85
1886	124	280.90	28	228.80	152	509.70
1887	131	297.85	42	502.30	173	800.15
1888	138	319.70	64	1066.30	202	1386.00

RÉSULTAT FINANCIER EN 1888

Comptes profits et pertes.

DOIT		AVOIR	
Frais annuels d'entretien. Fr.	74 381.35	*Recettes*	
Anciennes installations (1840-1884).		Eau ménagère B.P. . . Fr.	191 176.25
Amortissements sur anciennes installations. . .	68 512.15	id. H.P. rive droite	27 552.95
Int. 4 % sur le capital restant engagé au 31 décembre 1887, 1 214 985 fr. 90.	48 599.45	Eau ménagère H.P. rive gauche.	11 435 »
Nouvelles installations (1884-1888).		Eau motrice B.P.	60 179.65
Amortissements	87 008.85	id. H.P.	90 181.20
Int. 4 % sur le capital engagé au 31 décembre 1887, 3 176 483 fr. 55	127 059.35	Eau industrielle B.P. . . .	19 596.40
Bénéfice net pour balance.	141 723.65	id. H.P. . . .	5 424.50
		Divers.	31 739.20
		Eau employée pour les services municipaux.	110 000 »
			» »
Fr.	547 285.16	Fr.	547 285.16

N. B. — BP. Réseau à basse pression.
HP. id. haute —

Légende concernant les planches représentant le bâtiment des turbines

1, 2,	Groupes de pompes du réseau à basse pression (60 mètres d'élévation d'eau).
3	Groupe de pompes fonctionnant à volonté à haute ou basse pression.
4, 5, 6, 7, 8.	Groupes de pompes à haute pression (140 mètres d'élévation d'eau).
a	Canal d'amenée de l'eau motrice.
b	Canal de fuite de l'eau motrice.
c	Puisard des pompes.
d	Galerie des tuyaux.
e	Chambres des mécanismes de vannage des turbines.
f	Salle des pompes.
g	Grilles.
h	Vannes d'introduction de l'eau motrice.
i	Vannage des turbines.

k	Distributeurs des turbines.
l	Turbines.
m	Pivot des turbines.
n	Mécanisme de commande des vannages des turbines.
o	Arbres de transmission de la commande des vannages.
p	Tuyaux d'aspiration des pompes.
q	Soupapes d'aspiration.
r	id. de refoulement.
s	Tuyaux de refoulement.
t	Réservoirs d'air.
u	Tuyaux du réseau à haute pression.
v	id. à basse pression.
w	Réservoir d'air du réseau à haute pression servant à régulariser la pression quand le réservoir à air libre (situé à Bessinges), est isolé du reste du réseau.
x	Compresseur à air servant à fournir la quantité d'air nécessaire pour que les réservoirs puissent régulariser la pression.
y	Turbine actionnant le compresseur.
	id. le mécanisme de commande des vannes.
a_1	Tuyau d'amenée des eaux du lac dans le puisard des pompes.
b_1	Egout collecteur de la rive gauche.
c_1	Tige de la soupape équilibrée reliant les réseaux de haute et basse pression. Si le réservoir à air libre du réseau à haute pression est isolé du reste du réseau ; l'eau fournie en trop par les pompes haute pression est amenée dans la basse pression.
d_1	Passerelle de service pour le nettoyage des grilles.
e_1	Glissières pour des poutrelles horizontales servant à l'établissement d'un batardeau permettant l'épuisement du canal de fuite.
f_1	Sabot en fonte recevant en cas d'établissement du batardeau, le pied d'un fer à H destiné à renforcer le batardeau.
g_1	Puisard de la pompe pour l'épuisement du canal de fuite.
h_1	Passerelle de service du canal de fuite.
i_1	Mécanisme de commande des vannes d'introduction de l'eau motrice.
k_1	Treuil roulant pour le service des pompes.
l_1	id. des turbines.

TRANSMISSION DE LA FORCE PAR LES FLUIDES
sous pression et son application spéciale
AU POMPAGE DES EAUX D'ÉGOUTS

PAR

WILLIAM DONALDSON

INTRODUCTION

La question de la transmission de la force par les fluides sous pression (liquides et gaz) est nécessairement liée à celle du coût de la production de ce fluide sous pression, puisqu'il s'agit, en somme, de déterminer le moyen le plus économique et le plus efficace d'utiliser en la distribuant une puissance disponible ou que l'on peut développer en un certain point central. Si cette puissance disponible est, d'elle-même, susceptible d'être transmise, il faut évidemment en profiter pour la transmettre directement, sans aucune transformation intermédiaire, toutes les fois que le prix de cette transmission directe n'est pas supérieur à la perte qui accompagne toujours la conversion d'une forme de l'énergie en une autre forme.

Dans le cas où la puissance disponible doit se transformer finalement en énergie électrique, on peut avoir intérêt, quelle que soit la nature de cette puissance, à en opérer la transformation avant sa transmission ; mais la discussion du transport de la force par l'électricité sort du cadre de ce Mémoire, dans lequel nous ne discuterons que les transmissions par la pression des gaz et des liquides.

On appelle *gaz permanents* ceux qui restent à l'état de gaz sous toutes les conditions de température et de pression. Bien que de tels gaz n'existent probablement pas dans la nature, puisque l'on a réussi à liquéfier, par l'application simultanée de la compression et du froid, un grand nombre de gaz considérés auparavant comme permanents, nous considérerons dans ce Mémoire comme

permanent les gaz qui conservent leur état sous les pressions les plus élevées employées dans les transmissions de force.

Des deux fluides gazeux, l'air et la vapeur, exclusivement utilisés dans ce but. l'air seul répond à cette définition : la vapeur, au contraire, ne saurait être considérée comme un gaz permanent, puisqu'elle se condense dès que sa température s'abaisse au-dessous du point de saturation.

A moins qu'il ne s'agisse de produire définitivement de l'air comprimé au moyen de la vapeur dont on dispose au point central, il est préférable d'utiliser pour transmettre la force, cette vapeur même, toutes les fois que la transmission est non pas intermittente mais continue, et que la distance du point d'application au point de production est assez courte pour ne pas occasionner de pertes excessives par le refroidissement de la vapeur pendant son écoulement continu ; mais, comme l'objet principal de ce Mémoire est la discussion des meilleurs moyens à adopter pour transmettre à distance des forces d'une application intermittente, cas où la vapeur ne convient évidemment pas, nous devrons nous borner à la discussion des avantages comparés de l'application de l'air et de l'eau sous pression à ce genre de transmission.

A une seule exception près, celle d'une chute d'eau, toutes les autres puissances disponibles devront nécessairement subir une transformation qui les rende transmissibles. Dans le cas des combustibles, on peut en convertir une partie seulement en gaz transmissibles ; mais ce cas n'entre pas dans notre sujet.

Comme il est impossible de convertir une forme d'énergie en une autre sans perdre dans cette transformation seule une quantité notable du travail disponible, il faut transmettre la puissance des chutes d'eau directement, jamais par exemple sous forme d'air comprimé, à moins que la production même de cet air ne constitue le but final de l'installation. Dans ce dernier cas, il faut produire l'air comprimé à la chute même, avant sa transmission, puisque la puissance à transmettre effectivement utilisable et recueillie par la compression de l'air ne peut jamais être qu'une faible fraction du travail total nécessaire pour produire cet air comprimé. Bien que la perte de pression que l'air comprimé subit, dans les conditions habituelles de nos transmissions, soit, en tant pour 100 de sa pression initiale, environ quatre fois plus grande que dans une transmission de même puissance par l'eau à hautes pressions, cette perte est négligeable en comparaison de celle due à la fabrication même de l'air comprimé ou de la différence entre l'énergie de cet air et le travail dépensé pour la produire.

Nous n'avons donc, en ce qui concerne le prix de production, qu'à examiner les valeurs relatives de la puissance disponible effective créée par un travail donné du premier moteur employé à comprimer de l'air dans un réservoir ou de l'eau sous un accumulateur.

Les formules nécessaires pour l'étude de cette question sont bien connues : nous nous contenterons de les rappeler sans les démontrer. On trouvera la dé-

monstration de ces formules, ainsi que des Tables dressées d'après elles dans un ouvrage publié par l'auteur sur le sujet qui nous occupe [1] : nous appliquerons dans ce Mémoire les résultats numériques fournis par ces Tables.

CHAPITRE I.

COMPARAISON DES PRIX DE PRODUCTION DE L'AIR ET DE L'EAU COMPRIMÉS

Lorsqu'on emploie pour la transmission de la force un fluide incompressible comme l'eau, sa production n'exige pas d'autre travail que son refoulement à la pression voulue sous l'accumulateur, tandis qu'il faut au contraire réduire l'air à cette pression avant de le refouler dans son réservoir de pression. Si on laisse la température de l'air comprimé s'abaisser, avant son utilisation jusqu'à celle qu'il avait dans l'atmosphère avant sa compression, son énergie totale, fonction de la température seule, sera la même qu'avant sa compression ; mais cet air pourra néanmoins accomplir encore, par sa détente jusqu'à la pression atmosphérique, un travail équivalent à ce que nous appellerons l'*énergie sensible* de cet air comprimé. Or, le travail que l'air peut accomplir par sa détente n'est qu'une faible fraction du travail dépensé à le comprimer, et ce dernier travail est entièrement perdu quand on emploie l'air comprimé sans le détendre.

Désignons par p_0, v_0, t_0, p_1, v_1, t_1 la pression, le volume et la température absolus d'une unité de poids d'air avant et après sa compression; le travail de compression est donné par la formule:

$$\frac{p_1 v_1 - p_0 v_0}{\gamma - 1}$$

dans laquelle on désigne par $\gamma = \frac{0{,}2377}{0{,}1688} = 1{,}408$ le rapport des chaleurs spécifiques de l'air à pression et à volume constants.

Si la compression s'effectue suivant une adiabatique, le travail de compression est donné par l'une des deux formules

$$(2) \qquad \frac{p_0 v_0 \left(R^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right)}{\gamma - 1}$$

$$\frac{p_1 v_1 \left(R^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right)}{(\gamma - 1) R^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$$

1. *Transmission of power by fluid pressure*. 1 vol. London, Spon; 1888.

dans lesquelles on désigne par $R = \frac{p_1}{p_0}$ le rapport des pressions initiale et finale.

Le travail mécanique de compression est, d'autre part, équivalent au nombre de calories nécessaires pour élever la température de l'unité de poids d'air comprimé de t_0 à t_1.

A 60° F. (15° C.) et à la pression atmosphérique, de 14,7 livres par pouce carré, un pied cube d'air pèse 0,0764 livres, de sorte que, si l'on désigne par J l'équivalent mécanique de la chaleur, le travail de compression d'un pied cube d'air est égal, en pieds-livres, à

$$0{,}0764 \times 0{,}1688\,(t_1 - t_0)\,J = 6{,}721\left(R^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right)J$$

puisque $t_0 = 521°$ F. et que l'on a

$$t_1 = R^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\,t_0.$$

D'autre part, $p_0 v_0 = 2116{,}8$ pieds-livres, d'où l'équation

$$\frac{2116{,}8\left(R^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right)}{\gamma - 1} = 6{,}721\left(R^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right)J.$$

dont on déduit, pour J, la valeur

$$J = \frac{314{,}95}{\gamma - 1} = 771{,}93 \text{ pieds-livres,}$$

en unités françaises, 424 kilogrammètres.

On se trouve ici en présence d'nne concordance très remarquable entre les résultats d'expériences de natures absolument distinctes : la valeur de J ayant été fixée par Joule à 424 kilogrammètres en mesurant l'élévation de température produite dans une masse d'eau agitée par un travail mécanique donné, et celle du coefficient γ en déterminant expérimentalement les chaleurs spécifiques de l'air.

Puisque la température t'_0 de l'air, après sa détente de $(p_1\, t_0)$ à p_0, est de

$$t'_0 = t_0\left(\frac{p_0}{p_1}^{\frac{-1}{\gamma}}\right),$$

l'équivalent mécanique de son énergie sensible est égal à

$$6{,}721\left(1 - \frac{p_0}{p_1}^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right)J = 6{,}721\,J\left(\frac{R^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}{R^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}\right)$$

de sorte que le travail de la compression adiabatique de l'air est égal à $\left(R\frac{\lambda-1}{\gamma}\right)$ fois son énergie sensible.

D'autre part, le travail de refoulement de l'air dans le réservoir à la pression p_1 est égal à $p_1 v_1$, et celui que le piston du compresseur reçoit de l'air à p_0 est égal à $p_0 v_0$; il en résulte que le travail effectif de la machine à comprimer l'air est égal à

$$(4) \qquad \frac{p_1 v_1 - p_0 v_0}{\gamma - 1} + p_1 v_1 - p_0 v_0 = \gamma \left(\frac{p_1 v_1 - p_0 v_0}{\gamma - 1}\right),$$

ou à γ fois le travail de compression.

Lorsque la compression s'effectue suivant une isothermique, son travail est égal à

$$(5) \qquad p_0 v_0 \log. R.$$

et le travail total du moteur à

$$p_0 v_0 \log. R + p_0 v_0.$$

Comme $p_0 v_0$ représente le travail effectué par l'air sur le compresseur, le travail effectif de la pompe est, dans ce cas, égal précisément à

$$(6) \qquad p_0 v_0 \log. R,$$

ou au travail même de la compression.

Lorsqu'on chauffe l'air comprimé avant de l'utiliser, on perd en outre une certaine quantité de la chaleur d'échauffement par conductibilité, de sorte qu'il ne faut guère consacrer à cet échauffement que des chaleurs perdues.

Le seul moyen pratique de diminuer la perte due au refroidissement de l'air consiste à réduire d'abord le travail de refoulement de l'air comprimé dans le réservoir en lui enlevant le plus de chaleur possible pendant la période de compression, puis à envelopper les conduites et le réservoir d'isolants aussi parfaits que l'on peut.

S'il est nécessaire de pomper l'eau de circulation indispensable au refroidissement du compresseur, il faut ajouter cette dépense au prix de la compression.

On admet ordinairement, pour les compresseurs à enveloppe d'eau, que la température de l'air comprimé s'y élève au quart $\left(\frac{t_0 - t_1}{4}\right)$ de celle qui correspond à une compression adiabatique, de sorte que l'action des parois du compresseur augmente la température de l'air aspiré avant sa compression. Cette élévation de la température de l'air aspiré n'augmente d'abord en rien le travail de la pompe par unité de volume d'air comprimé ; mais le poids de l'air aspiré par chaque cause, ainsi que le travail effectif produit, diminuent en raison in-

verse des températures initiales. On obtient, d'après l'hypothèse précédente, la formule

$$\frac{t_0}{t_1 + t} = \frac{4}{R^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} + 3}.$$

Lorsqu'on communique de l'énergie à l'air directement par la chaleur seule, cette énergie communiquée est équivalente au nombre de calories transmises à l'air ; mais, lorsqu'on augmente l'énergie de l'air par compression, une partie de cet accroissement est due au travail exercé par l'atmosphère sur le piston du compresseur, et ce travail est égal à la contre-pression exercée par l'atmosphère sur les pistons des machines qui utilisent ensuite la détente de l'air comprimé ; de sorte que l'on utilise, dans le cas d'une compression et d'une détente adiabatique de l'air, la totalité du travail de compression, tandis que l'on n'utilise, dans le cas d'un chauffage de l'air, que la différence entre l'énergie tolale ainsi communiquée à l'air et la contre-pression de l'atmosphère. Si l'on échauffe l'air dans un récipient dilatable, l'énergie dépensée à accroître son volume est restituée dans l'hypothèse d'un fonctionnement adiabatique. Nous devons donc tenir compte, en évaluant le rendement de la combinaison thermique, de la perte due à la différence des chaleurs spécifiques à pressions et à volumes constants, entièrement sacrifiée dans la plupart des moteurs à air chaud. La chaleur cédée après refroidissement par les parois qui servent au passage de l'air chaud est loin de compenser la chaleur perdue par le rayonnement du moteur dans l'atmosphère. Il en résulte que toutes les machines à air chaud fondées sur le refroidissement et l'échauffement alternatifs de l'air ont un faible rendement.

Pour déterminer l'admission minimum ou la plus grande détente de l'air comprimé dans la machine qui l'utilise, désignons par V le volume d'air comprimé admis ; le volume V_0 que cet air occupera après sa détente de $R = \frac{p_1}{p_0}$ sera donné par la formule

$$V_0 = \frac{RV}{R^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}} = VR^{\frac{1}{\gamma}},$$

de sorte que la détente nécessaire pour ramener l'air à la pression atmosphérique est donnée par l'expression

$$\frac{v}{v_0} = \frac{1}{R^{\frac{1}{\gamma}}}. \tag{13}$$

Si la pression finale ou échappement est supérieure à celle de l'atmosphère, la chute de température est moindre, et l'on a, en désignant par R_1 la détente nou-

velle et par P la chute de pression correspondante exprimée en tant pour 100 de la chute due à la détente R, l'expression

$$\frac{P}{100}\left(1 - \frac{1}{R^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}\right) = 1 - \frac{1}{R_1^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}},$$

d'où

$$R_1 = \frac{R}{\left[0{,}0P + (1 - 0{,}0P)\, R^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \tag{14}$$

et, pour l'admission,

$$\frac{v}{v_0} = \frac{1}{R_1^{\frac{1}{\gamma}}}$$

On peut évaluer les valeurs maxima de P d'après les températures les plus basses réalisées dans les machines frigorifiques à air, où l'air comprimé à environ 4 atmosphères effectives s'abaisse rarement à plus de — 60° C. (— 55° F.). La température minimum absolue dans le cylindre de détente est donc de 213° et la chute de température, de 288° à 213°, de 75° seulement, tandis que la chute correspondant à la détente de 4 atmosphères à 1 atmosphère est de 97°. Puisque le travail utilisé est proportionnel à la chute de température, la proportion de la chaleur sensible utilisable est égale à

$$\frac{75}{97} \times 100 = 66\ \%$$

et, pour cette utilisation P, le degré de détente R_1 est donné par l'expression

$$R_1 = \frac{R}{\left(0{,}66 + 0{,}34\, R^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}}$$

Nous sommes maintenant en mesure de calculer le rapport du travail effectif maximum que peut rendre un poids donné d'air comprimé au travail dépensé au compresseur en marche isothermique ou adiabatique ; et cela avec une grande exactitude, car la seule inconnue est la valeur exacte de γ. La différence entre les valeurs extrêmes de γ adoptées par divers savants ne dépasse pas le $\frac{1}{40}$ de sa valeur maximum, et l'écart entre les résultats de la pratique expérimentale et ceux de la théorie provient de l'impossibilité de réaliser un fonctionnement rigoureusement adiabatique ou isothermique.

La Table I ci-dessous donne :

Colonne I. Rapports de compression.
— II. Pressions indiquées p_1 en kilogrammes par centimètre carré.
— III. Températures absolues de l'air correspondant à une compression adiabatique p_1 partant d'une température initiale de 15°.
— IV. Températures absolues de l'air à la fin de la détente après une compression isothermique à 15°.
V. Degré d'admission correspondant à une détente allant jusqu'à la pression atmosphérique.
— VI. Rapport du travail de compression du moteur au travail total de compression adiabatique.
— VII. Rapport du travail de compression isothermique au travail de compression adiabatique.
— VIII. Rapport du travail de refoulement de l'air dans le réservoir en marche isothermique au travail total de compression adiabatique.
— IX. Rapport du travail théorique effectif maximum disponible par l'énergie sensible de l'air après sa compression isothermique au travail total de la compression adiabatique.
— X. Somme des rapports VIII et IX.
— XI. Rapport avec travail isothermique correspondant à celui de la colonne VIII avec travail adiabatique.
— XII. Rapport avec travail isothermique correspondant à celui de la colonne XI.
— XIII. Rapport avec travail isothermique correspondant à celui de la colonne X.

TABLE I.

I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	XIII.
1,5.....	0,56	307	240	0,71	0,17	0,98	0,80	0,09	0,89	0,81	0,09	0,91
2	1,05	340	218	0,61	0,31	0,90	0,63	0,18	0,81	0,70	0,20	0,90
3	2,10	330	195	0,46	0,40	0,86	0,53	0,21	0,74	0,62	0,26	0,88
4	3,10	415	175	0,37	0,49	0,79	0,43	0,23	0,66	0,54	0 29	0,83
5	4,20	445	165	0,31	0,54	0,77	0,39	0,23	0,62	0,50	0,30	0,80
6	5,25	475	150	0,28	0,58	0,74	0,35	0,23	0·56	0,47	0,31	0,78
8	7,20	510	140	0,23	0,62	0,73	0,31	0,23	0,54	0,42	0,31	0,73
10	9,25	545	130	0,20	0,65	0,70	0,27	0,23	0,50	0,38	0,33	0,71
15	14,55	620	115	,015	0,71	0,66	0,23	0,23	0,46	0,33	0,34	0,67

La Table II renferme les données pratiques et réelles probables suivantes éduites des données théoriques de la Table I.

I. Rapport de compression.
II. Coefficients (*a*) tenant compte de l'échauffement initial de l'air à l'admission.
III. Rapport d'admission maximum.
IV. Produit des pressions de la colonne II, Table I, par 0,66 et le coefficient (*a*).

V. Rapport de la colonne IX, Table 1, × 0,66.
VI. Rapport de la colonne VII, Table I, × (*a*).
VII. Rapport du travail de compression adiabatique au travail de refoulement de l'air dans le réservoir après sa composition isothermique.
VIII. Moyenne des rapports des colonnes VI, Table II, et XI, Table I.
IX. Rapport du travail de compression en partie isothermique au travail de refoulement de l'air dans le réservoir après une compression isothermique.
X. Somme des rapports des colonnes IV et VI, Table II.
XI. Rapport du travail de compression adiabatique au travail total utilisable effectif.
XII. Somme des rapports, colonne XI. Table I, et colonne V, Table II.
XIII. Moyenne des rapports des colonnes X et XII, Table II.
XIV. Rapport du travail de compression à peu près isothermique au travail total utilisable effectif.

TABLE II.

I.	II. (*a*)	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	XIII.	XIV.
1,5.....	0,97	0,84	0,04	0,06	0,78	1,28	0,80	1,25	0,82	1,22	0,88	0,85	1,18
2.....	0,95	0,74	0,11	0,13	0,60	1,67	0,60	1,54	0,71	1,40	0,83	0,77	1,30
3.....	0,91	0,61	0,13	0,17	0,48	2,08	0,55	1,82	0,61	1,64	0,79	0,70	1,43
4.....	0,89	0,55	0,14	0,19	0,38	2,63	0,46	2,17	0,52	1,92	0,73	9,62	1,61
5.....	0,87	0,51	0,13	0,20	0,34	2,94	0,42	2,37	0,47	2,13	0,70	0,58	1,72
6.....	0,85	0,47	0,13	0,20	0,30	3,33	0,38	2,63	0,43	2,32	0,67	0,55	1,82
8.....	0,83	0,42	0,13	0,20	0,26	3,85	0,33	3,03	0,39	2,66	0,62	0,50	2,00
10.....	0,80	0,39	0,12	0,21	0,22	4,55	0,30	3,33	9,34	3,00	0,59	0,46	2,18
15.....	0,77	0,34	0,12	0,21	0,18	5,55	0,25	4,00	0,30	3,34	0,54	0,42	2,39

Il faut, pour employer l'air comprimé avec détente, disposer de machines appropriées, construites en outre de manière à pouvoir admettre l'air pendant toute la durée de la course du piston. Les machines à vapeur ordinaires, dont la plus grande admission ne dépasse guère le tiers de la course, ne pourraient donc marcher utilement à l'air comprimé qu'avec des pressions d'au moins 14 atmosphères (colonne III, Table II), à moins de modifier leur mécanisme de détente.

Les données des Tables I et II ne se rapportent qu'au travail net du cylindre à air; le travail moteur à dépenser pour obtenir ces résultats est toujours plus grand que le travail réellement dépensé dans le cylindre compresseur parce qu'il doit vaincre les frottements des mécanismes. Avec les grands compresseurs bien construits, le travail de la machine motrice ne dépasse que de 20 pour 100 environ celui de la compression proprement dite, mais cette perte est beaucoup plus importante avec les petits compresseurs. Il se produit en outre toujours quelques fuites au piston et aux soupapes avant leur fermeture complète, de sorte qu'il

faut, en somme, majorer d'au moins 25 pour 100 le travail de compression pour évaluer la puissance minimum de la machine motrice.

Puisque la machine motrice doit être assez puissante pour effectuer la compression dans toutes les conditions, il faut admettre pour la calculer l'hypothèse la plus défavorable d'une compression adiabatique, et considérer le travail effectif comme égal à celui du refoulement de l'air dans le réservoir après une compression isothermique.

Dans la majorité des emplois de l'air comprimé, on ne peut pas en utiliser la détente ; et il faut, toutes les fois qu'on l'utilise, réchauffer l'air ou prendre les dispositions indispensables pour se débarrasser de la neige qui se forme pendant la détente par l'abaissement de la température de l'air au-dessous de zéro.

Il faut donc employer, pour le calcul de la puissance motrice maximum nécessaire, les rapports du travail de compression au travail effectif inscrits dans la colonne VII, Table II.

En général, dans les installations d'air comprimé, on se donne une puissance motrice égale au double du travail maximum de compression des pompes ; de sorte que, si la perte due aux fuites et aux frottements des mécanismes ne dépasse pas 25 pour 100, l'on dispose ainsi d'un excédent de puissance de $\frac{2}{1.25} = 1,6$, ou de 60 pour 100 seulement, ce qui n'est pas de trop pour couvrir les risques des erreurs d'appréciation et assurer un fonctionnement économique. S'il faut pousser les machines et les chaudières jusqu'à leur production maximum, on ne peut pas songer à un fonctionnement économique. Si la perte due aux fuites et aux résistances passives atteint 50 pour 100, le rapport de la force motrice maximum disponible au travail maximum tombe à $\frac{2}{1.50} = 1,34$, et l'excédent n'est plus que de 34 pour 100.

On a désigné par le symbole IHP (*indicated horse power*) la puissance de la machine motrice en chevaux indiqués, et par HP la puissance effective développée. La Table suivante donne pour les valeurs maxima des rapports $\frac{\text{IHP}}{\text{HP}}$ le double des rapports donnés dans la colonne VII de la Table II : nous considérons ces rapports comme pratiques et offrant toute sécurité.

TABLE III.

	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.
Valeurs de R	1,5	2	3	4	5	6	8	10	15
Valeurs pratiques de $\frac{IHP}{HP}$	2,56	3,34	4,16	5,26	5,88	6 66	7,70	9,10	11,10
Valeurs de $\frac{IHP}{HP}$ pour une compression adiabatique sans détente . .	1,60	2,09	2,60	3,30	3,68	4,16	4 81	5,69	6,94
Valeurs pratiques minima de $\frac{IHP}{HP}$ sans détente	1,56	1,93	2,28	2,72	2,97	3,30	3,80	4,17	5,00
Valeurs pratiques minima de $\frac{IHP}{HP}$ avec détente	1,48	1,6	1,79	2,00	2,20	2,28	2,50	2,73	3,00

En pratique l'échauffement de l'air par sa compression est, comme nous l'avons dit, réduit de près de moitié par une marche à peu près isothermique ; la véritable valeur du rapport $\frac{IHP}{HP}$ sera donc probablement une moyenne entre les rapports correspondant aux fonctionnements adiabatiques et isothermiques, c'est-à-dire égale aux rapports donnés par les colonnes XI et XIV de la Table II augmentés du tant pour 100 dû aux pertes par les fuites et les frottements. Il suffira donc d'augmenter de 25 pour 100 ces chiffres pour déterminer la valeur pratique minimum du rapport $\frac{IHP}{HP}$ avec ou sans détente de l'air comprimé (*voir* Table III).

Mais l'air comprimé dans le réservoir de pression et ramené à sa température initiale ne peut fournir à l'application qu'une partie de son énergie potentielle, variable avec la longueur de la transmission et la nature du travail à effectuer; et il est impossible de déterminer ce rendement final sans connaître exactement toutes les particularités de la distribution. On peut néanmoins affirmer que, en général, si l'on tient compte des frottements de la machine mue par l'air comprimé, ou opératrice, es frottements des conduites et des fuites, il ne faut pas espérer pouvoir recueillir plus de 60 pour 100 de l'énergie potentielle de l'air comprimé refroidi. On obtiendra donc des valeurs minima probablement sûres et pratiques du rapport $\frac{IHP}{HP}$ (HP représentant ici le travail effectif final recueilli aux opérateurs) en divisant par 0,6 les données de la Table III.

C'est ainsi que nous avons dressé la Table IV :

TABLE IV.

	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX
Valeurs de R	$1\frac{1}{2}$	2	3	4	5	6	8	10	15
Valeurs pratiques de $\frac{IHP}{HP}$	$4\frac{1}{4}$	$5\frac{1}{2}$	$6\frac{3}{4}$	$8\frac{3}{4}$	$9\frac{3}{4}$	11	13	15	19
Valeurs de $\frac{IHP}{HP}$ pour une compression adiabatique sans détente. .	$2\frac{3}{4}$	$3\frac{1}{2}$	$4\frac{1}{4}$	$5\frac{1}{2}$	6	7	8	$9\frac{1}{2}$	$11\frac{1}{2}$
Valeurs pratiques minima de $\frac{IHP}{HP}$ sans détente	$2\frac{1}{2}$	$3\frac{1}{4}$	$3\frac{3}{4}$	$4\frac{1}{2}$	5	$5\frac{1}{2}$	$6\frac{1}{4}$	7	$8\frac{1}{4}$
Valeurs pratiques minima de $\frac{IHP}{HP}$ avec détente.	$1\frac{1}{2}$	$2\frac{3}{4}$	3	$3\frac{1}{4}$	$3\frac{3}{4}$	4	$4\frac{1}{4}$	$4\frac{1}{2}$	5

L'énergie totale d'un poids donné d'air est proportionnelle à sa température absolue ; elle est donc la même, que cette température soit due à une compression ou à un échauffement direct ; mais, dans ce dernier cas, l'élévation de la température de l'air est due tout entière à la chaleur appliquée pour la produire, tandis que, avec la compression, on n'augmente que l'énergie sensible de l'air, et c'est cette énergie seule que l'on peut ensuite utiliser. Les rapports calculés dans la colonne VI de la Table I, multipliés par 100, donnent donc l'utilisation pour 100 maximum possible de *l'énergie actuelle emmagasinée dans l'air* à volume constant par la chaleur, sans perte *subséquente* par conductibilité.

Après sa compression, l'air ramené à sa température initiale renferme encore de l'énergie sensible, et l'on n'aurait à lui communiquer, en l'échauffant, que la différence des chaleurs sensibles avant et après cet échauffement. Il ne paraît pas que l'on puisse utiliser en pratique l'énergie sensible de l'air après son échauffement avec un meilleur rendement que l'énergie de l'air froid, pourvu que l'on prenne les dispositions nécessaires pour se débarrasser de la neige de détente.

Les rapports de la colonne IX, Table I, multipliés par 100, donnent le tant pour 100 du travail effectif que l'on peut retirer de l'énergie sensible de l'air après son refroidissement en fonction du travail dépensé pour le comprimer ; et, comme ce travail dépensé est égal à γ fois le travail de compression adiabatique, il en résulte que le produit de ces pourcentages par γ donnera le travail utilisable de l'énergie sensible de l'air comprimé, puis refroidi en tant pour 100 du travail total de compression adiabatique, ou en fonction de la chaleur nécessaire pour réchauffer l'air à volume constant. La Table V donne les pourcentages des énergies sensibles adiabatiques et isothermiques et leur différences, qui représentent le tant pour 100 net que l'on peut retenir de l'énergie absolue communiquée à

l'air en le réchauffant, sans perte par communication de chaleur aux corps environnants.

TABLE V.

	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.
Valeurs de R	1,5	2	3	4	5	6	8	10	15
Energie sensible adiabatique . . .	17	31	40	49	54	58	62	66	71
Energie sensible isothermique . .	13	26	30	32	32	32	32	32	32
Pourcentage utilisable de l'énergie absolue communiquée par la chaleur.	4	6	10	17	22	26	30	33	39

On ne peut transmettre de la chaleur à l'air qu'au travers de parois métalliques parcourues par l'air; car on ne peut brûler du gaz dans un réservoir d'air que s'il possède une pression un peu plus élevée que celle de l'air et il faudrait donc aussi le comprimer par une pompe spéciale. On perdra donc beaucoup de chaleur par conductibilité, et l'échauffement de l'air s'effectuera avec un mauvais rendement.

Lorsque l'air est échauffé par compression, la chaleur qu'il perd en se refroidissant est équivalente au travail total de compression ou à l'énergie absolue communiquée à l'air; mais, lorsqu'on échauffe l'air directement, on ne lui communique qu'une partie de la chaleur dépensée. Dans la compression, on perd par le frottement des mécanismes, comme dans l'échauffement direct, par la conductibilité; mais on peut toujours évaluer exactement la première perte, jamais la seconde.

A moins d'utiliser l'air comprimé aussi vite qu'on le produit, l'énergie utilisable n'est représentée que par le travail que l'air développe en tombant, dans le réservoir, de la pression la plus élevée à la pression la plus basse des opérateurs, et ce travail est nécessairement très faible. Outre ce travail, inutilement consacré à comprimer l'air à une pression plus élevée qu'il ne le faut, on subira une autre perte due au refroidissement de l'air par la détente jusqu'à la pression admise aux opérateurs. Il ne faut pas songer à emmagasiner dans des accumulateurs l'air comprimé aux pressions habituelles de la pratique à cause de son trop grand volume.

Lorsqu'on a besoin d'air comprimé pour effectuer à une pression minimum donnée un travail variable, on est obligé, afin de pouvoir utiliser la détente de l'air pour le travail maximum prévu, de maintenir cet air à une pression beaucoup plus élevée que la pression minimum suffisante lorsque le travail est lui-même réduit à son minimum. De là une perte analogue à celle que l'on subit

toujours quand on enmagasine de l'énergie pour un travail futur : on ne peut éviter cette perte par l'emploi d'accumulateurs que si les variations du travail sont faibles.

Rendement de l'eau sous pression.

Le travail net dépensé pour pomper de l'eau, lorsque le produit du volume par la pression est le même que celui de l'air comprimé après sa compression isothermique, est évidemment égal, abstraction faite des résistances passives, au travail dépensé pour refouler l'air comprimé dans son réservoir. Mais le frottement d'un piston est proportionnel au produit de son diamètre par la pression, et sa résistance totale au produit de la pression par le carré du diamètre ; il en résulte que le travail F dépensé à varier le frottement du piston est, exprimé en tant pour 100 du travail total, indépendant de la pression et inversement proportionnel au diamètre d ; on peut l'exprimer par la formule

$$F = \frac{c}{d},$$

c étant un coefficient variable avec la nature de la garniture du piston. D'après les expériences les plus exactes, la valeur de c varie de 40 pour les cuirs faits à 60 pour les cuirs neufs (d étant exprimé en pouces), et, comme la résistance des garnitures mouillées est toujours plus faible que celle des garnitures sèches, on ne risque rien d'admettre que le frottement des pistons des compresseurs d'air est au moins égal à celui des pistons de pompes garnis de cuir.

Il est facile d'établir une comparaison entre les résistances à vaincre pour emmagasiner des puissances égales sous forme d'air ou d'eau comprimés ; nous admettrons, pour simplifier, que, dans les deux cas, le rapport de la course au diamètre du piston est le même pour toutes les dimensions des pompes.

Désignons par

D et d les diamètres des pompes à eau et à air ;
m le rapport de la course au diamètre ;
P la pression absolue par unité de surface ;
V le volume de l'eau pompée ;
R_1 le rapport $\frac{P}{p_1}$ de pressions absolues maxima de l'eau et de l'air.
r le rapport des nombres des courses accomplies par unité de temps par les pompes à eau et à air.

Puisque le travail effectif est égal dans les deux cas, abstraction faite du travail de compression de l'air, on a

$$PV = p_1 v_1 = p_0 v_0$$

v_1 étant le volume de l'air pris à $p_0 v_0$ puis refoulé à p_1 dans le réservoir, après sa compression isothermique à p_1.

On a aussi

$$\frac{\pi\, m\, D^3}{4} = V = \frac{v_1}{R_1} = \frac{\pi r\, m\, d^3}{4\, R_1\, R}$$

d'où

$$D = \frac{d\sqrt[3]{r}}{\sqrt[3]{RR_1}}.$$

Or, le travail total de la pompe à eau, y compris celui des résistances passives, est égal à

$$PV\left(1 + \frac{c}{D}\right) = p_0\, v_0 \left(1 + \frac{c\sqrt[3]{RR_1}}{d\sqrt[3]{r}}\right),$$

et celui du cylindre à air

$$c_1\, p_0\, v_0 \left(1 + \frac{c}{d}\right),$$

c_1 étant le rapport du travail total de la pompe au travail de refoulement de l'air isothermique comprimé dans le réservoir de pression.

Le rapport du travail total de la pompe à air au travail de la pompe à eau est donc égal à

$$\frac{c_1\left(1 + \frac{c}{d}\right)}{1 + \frac{c\sqrt[3]{RR_1}}{d\sqrt[3]{r}}}.$$

Comme les pompes à air marchent en général quatre fois plus vite que les pompes à eau ($r = 4$), il vient, en faisant dans cette formule $r = 4$, $c = 60$ l'expression

$$\frac{c_1\,(d + 0{,}6)}{d + 0{,}377\sqrt[3]{RR_1}} = c_1\, A.$$

Puisque $R = \frac{p_1}{p_0}$ et $R_1 = \frac{P}{p_1}$, le produit $RR_1 = \frac{P}{p_0}$ est indépendant de p_1 et proportionnel à la pression absolue de l'eau P.

La Table VI donné les valeurs du coefficient A par lequel il faut multiplier c_1, pour des valeurs de RR_1 variant de $1\frac{1}{2}$ à 100, et des pompes à air de 230 millimètres et 610 millimètres de diamètre.

TABLE VI.

	I.	II	III	IV.	V.	VI.
Valeurs de RR_1	$1\frac{1}{2}$	4	15	30	60	100
Valeurs de P en kilogrammes par centimètre carré	1,50	4,20	15	38	60	103
Valeurs de A pour d = 230 mm.	1,18	1,00	0,97	0,95	0,92	0,89
Valeurs de A pour d = 610 mm.	1,01	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96

Lavaleur du coefficient A est, pour des pressions supérieures à 100 atmosphères, tellement voisine de l'unité que l'on peut considérer les rapports, donnés dans les Tables précédentes, du travail total de compression au travail de refoulement de l'air isothermique dans le réservoir de pression comme exprimant aussi exactement les rapports du travail de la compression de l'air au travail de refoulement de l'eau, à puissances effectives produites égales.

CHAPITRE II.

COMPARAISON ENTRE L'AIR ET L'EAU COMME AGENTS DE TRANSMISSION ET D'EMMAGASINAGE DE LA FORCE.

D'après quelques autorités, la résistance des conduites à l'écoulement de l'air est indépendante de sa densité ; mais cette opinion est évidemment insoutenable, car la pression doit augmenter à la fois le frottement superficiel de l'air contre les parois des conduites et celui des molécules de l'air les unes contre les autres. Il est vrai que, dans la pratique, la pression de l'air ne varie que de 2 atmosphères à 4 atmosphères, écart trop faible pour que l'on ait à tenir compte des variations corrélatives de la résistance des conduites.

La formule ci-dessous, déduite d'une expression donnée par Box dans son *Traité de la chaleur*, donne une valeur suffisamment exacte de la perte de charge H due à la résistance des conduites :

$$H = \frac{0{,}000015\, l\, v^2}{d}.$$

Dans cette formule, on désigne par

H la perte de charge en pouces d'eau ;
d le diamètre de la conduite en pouces ;
l sa longueur en yards ;
v la vitesse de l'air en pouces par seconde.

Réciproquement, la vitesse due à une charge H est donnée, pour une conduite de 1000 yards de long, par la formule

$$v = 2{,}5 \sqrt{d\,\mathrm{H}}.$$

L'eau étant incompressible, sa densité reste invariable à toutes les pressions, et l'accroissement de la résistance des conduites avec la pression ne doit dépendre que du frottement des parois. L'auteur ne connaît aucune expérience à ce sujet, mais il pense que l'on ne peut guère que désavantager la transmission par l'eau en considérant le frottement des parois comme indépendant de la pression. On considère, en général, les formules de Kutter sur l'écoulement de l'eau comme les plus exactes : d'après ces formules, on obtient, en désignant par v la vitesse de l'eau en pouces par seconde, par d le diamètre des conduites en pouce, et par s leur pente hydrostatique, les résultats consignés aux Tableaux A et B.

Nous avons adopté, pour notre comparaison entre l'air et l'eau, la moyenne des résistances données par les Tableaux A et B.

Tableau A *(Tuyaux à parois lisses).*

	mm	*mm*		v
Tuyaux de	13 à	60	de diamètre. . .	$107\ d^{0,9}\sqrt{s}$
»	60 à	130	» . . .	$115\ d^{0,8}\sqrt{s}$
»	130 à	250	» . . .	$134\ d^{0,7}\sqrt{s}$
»	250 à	1m,800	» . . .	$166\ d^{0,6}\sqrt{s}$
»	1m,800 et au-delà		» . . .	$256\ \sqrt{ds}$

Tableau B *(Tuyaux légèrement rugueux).*

	mm	*mm*		v
Tuyaux de	13 à	60	de diamètre. . .	$63\ d\ \sqrt{s}$
»	60 à	130	» . . .	$68\ d^{0,9}\sqrt{s}$
»	130 à	250	» . . .	$78\ d^{0,8}\sqrt{s}$
»	250 à	610	» . . .	$100\ d^{0,7}\sqrt{s}$
»	610 à	2m,400	» . . .	$138\ d^{0,6}\sqrt{s}$
»	2m,400 et au-delà		» . . .	$220\ \sqrt{ds}$

La pression soudaine occasionnée par l'arrêt brusque d'un écoulement d'eau dans un tuyau fermé est proportionnelle à la variation de pression due à l'annulation brusque de la quantité de mouvement de la colonne d'eau. Avec les gaz, cet effet est par conséquent insignifiant. Avec l'eau, une colonne d'un centimètre carré de base et de l mètres de long pèse $\frac{l}{10}$ kilogrammes, et produit par son ra-

lentissement brusque de v_1 à v_2 mètres par seconde, une pression de

$$\frac{l\,(v_1 - v_2)}{10g}$$

kilogrammes par centimètre carré.

Comme l'allongement ou la compression d'un corps élastique soumis à un effort brusque est égal au double de la déformation qu'il subirait sous un effort de même intensité appliqué graduellement, l'augmentation de pression ne doit jamais, dans le cas qui nous occupe, dépasser la moitié de la différence entre la charge de rupture et la charge pratique des conduites, de sorte que la charge ou la pression pratique P est donnée par la formule

$$\frac{l\,(v_1 - v_2)}{2g} \leqq \frac{P}{2}.$$

Lorsque la puissance du fluide comprimé est distribuée à plusieurs opérateurs la vitesse moyenne de l'écoulement ne peut guère varier brusquement d'une quantité appréciable, puisque tous les opérateurs ne viennent jamais à s'arrêter ni à se mettre en marche simultanément.

Il faut, en comparant les prix de la canalisation pour l'air et pour l'eau, prendre pour point de comparaison non pas le prix par mètre des tuyaux, mais leur dépense d'établissement par unité de puissance transportée.

Les Tables suivantes ont été calculées en supposant une pression moyenne indiquée de 56 à 63 kilogrammes par centimètre carré pour l'eau, et de $2^k,8$ à $3^k,5$ pour l'air, avec la condition que la perte de charge ne dépasserait pas 5 % de ces pressions pour une longueur de tuyaux de 5500 mètres, correspondant à une pente hydrostatique de $\frac{1}{180}$, ou à une hauteur d'eau de 260 millimètres.

La Table VII donne

I. Diamètre des conduites en millimètres.
II. Vitesse d'écoulement de l'eau en mètres par seconde.
III. Puissance en chevaux par minute transmise par l'eau à 56 kilogr. (A).
IV. Vitesse d'écoulement de l'air.
V. Puissance en chevaux par minute transmise par l'air sans détente à $3^{kg},10$ (A').
VI. Puissance transmise par l'air, somme de A + 0,66 de l'énergie sensible effective de l'air après son refroidissement (A").
VII. Rapport $\frac{A}{A'}$.
VIII. Rapport $\frac{A}{A''}$.
IX. Longueur maximum en mètres admissible pour les conduites sans risques de les endommager par un arrêt brusque de l'eau à 56 kg.
X. Longueur maximum en mètres admissible pour les conduites sans risques de les endommager par un arrêt brusque de l'eau à une pression de 70 kilog. par centimètre carré.

TABLE VII.

I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.
		(A)		(A')	(A")				
76.	0,46	16	4,25	8	11	2,0	1,5	6100	779
100.	0,55	33	4,90	16	31	2,0	1,6	5100	640
130.	0,70	63	5,50	28	37	2,3	1,7	4260	520
150.	0,76	103	6,10	45	60	2,3	1,7	3600	460
200.	0,95	227	7	94	125	2,4	1,8	2900	360
250.	1,10	4	7,90	162	216	2,5	1,8	2500	320
300.	1,20	658	9,90	254	339	2,6	1,9	2300	270
460.	1,60	1834	10,35	692	923	2,7	2,0	1800	220
610.	1,95	4194	12,20	1448	1931	2,9	2,2	1450	180

Le rapport $\frac{A''}{A'}$ des chiffres des colonnes VII et VIII donne le prix comparatif par mètre des tuyaux transmettant avec la même dépense par cheval l'eau ou l'air comprimé.

On a comparé dans la Table VII la puissance transmissible par de l'eau à une pression initiale indiquée de 60 kilogrammes par centimétre carré avec celle de l'air à 32 kilogrammes par des tuyaux de même diamètre, avec une même perte de charge proportionnelle en tant pour 100 de la pression initiale. Il faut, pour compléter la comparaison, calculer la perte de charge encourue lorqu'on augmente la vitesse de l'air jusqu'à lui faire transmettre la même puissance que l'eau. On a supposé pour simplifier que la pression finale restait la même, à 3k,10, de manière à n'avoir plus à calculer que la valeur de H nécessaire pour rendre le volume de l'air transmis égal au débit correspondant à une perte de charge de 5 % de la pression initiale, multipliée par les rapports calculés aux colonnes VII et VIII de la Table VII.

La Table VIII donne les pressions initiales et les pertes de charge en tant pour 100 de ces pressions, pour les diamètres des tuyaux de la Table VI.

TABLE VIII.

DIAMÈTRE des tuyaux	AIR SANS DÉTENTE		AIR AVEC DÉTENTE	
	Pression initiale eu kilogrammes par cent. carré	Perte de charge en tant pour cent	Pression initiale ee kilogrammes par cent. carré	Perte de charge en tant pour cent
76	3,70	17	3,40	10
100	3,70	17	3,50	12
130	3,90	21	3,60	
150	3,90	21	5,60	
200	4,05	23	3,65	16
250	4,15	25	3,65	16
300	4,20	26	3,65	16
460	4,30	27	3,70	17
610	4,50	31	3,	20

Lorsqu'on essaye une conduite à l'eau, on en connaît l'état dès qu'on l'a remplie d'eau à la pression maximum, car toutes les fuites se révèlent immédiatement ; mais il faut, pour les canalisations d'air, vérifier les conduites à l'air, et le seul moyen d'en constater l'étanchéité consiste à y maintenir la pression de l'air longtemps après qu'il a atteint la température des conduites. La recherche des fuites est toujours bien plns difficile avec l'air que pour l'eau.

Il est nécessaire, si l'on veut assurer l'uniformité du service de la station centrale, de se procurer les moyens d'emmagasiner de la puissance, pour parer aux variations du débit. Avec l'eau à haute pression, il suffit d'un petit accumulateur, et la seule perte qu'il occasionne est celle du travail dépensé à vaincre le frottement de son piston. Le volume trop considérable de l'air comprimé empêche, au contraire, l'emploi des accumulateurs ; on a proposé l'emploi de grands réservoirs de capacité invariable, dont les variations de pression parent aux inégalités du débit, mais avec une perte équivalente au travail nécessaire pour y comprimer l'air à une pression supérieure à celle de son utilisation.

CHAPITRE III

APPLICATION SPÉCIALE DE L'EAU A HAUTE PRESSION ET DE L'AIR COMPRIMÉ AU POMPAGE DES EAUX D'ÉGOUTS

L'emploi d'une transmission de force pour le pompage des eaux d'égoûts permet de diviser la superficie du territoire à drainer en plusieurs districts munis de stations de pompes locales, actionnées par la force motrice d'une station centrale. Les avantages de cette répartition des eaux d'égoûts entre plusieurs stations sont les suivants :

1° On n'a besoin que d'égoûts d'un faible diamètre, assez profonds pour drainer les habitations ;

2° On obtiendra toujours, quelle que soit la configuration du terrain, des pentes d'écoulement suffisantes ;

3° L'emploi des pompes automatiques enlevant les eaux aussi vite qu'elles arrivent maintient les égoûts constamment libres et, *si leur fonctionnement automatique est assuré, comme il doit l'être, par le jeu même de la pompe, il n'est besoin d'aucun réservoir si petit qu'il soit pour l'emmagasinage des eaux.*

Nous avons vu, au chapitre II, qu'en proportionnant convenablement le diamètre des conduites à la puissance à transmettre, cette transmission par l'air ou par l'eau, s'opère avec des conduites de diamètres modérés, et jusqu'à une distance de 6000 mètres environ, sans subir de la résistance des conduites une

perte de plus de 5 pour 100 de la pression initiale. Avec l'eau, on n'a guère à tenir compte, en outre, que des fuites et du rendement de la pompe actionnée, tandis qu'avec l'air il faut faire entrer en ligne les considérations suivantes :

1° Possibilité de l'abaissement de la température de l'air comprimé au-dessous de la température initiale de l'air avant sa compression ;

2° Effets des variations de la hauteur du refoulement des pompes aux diverses stations ;

3° Ecarts entre les pressions maxima et minima de l'air, nécessaire pour parer aux variations du débit des égoûts.

La température initiale de l'air dans la salle des machines varie à peu près de 15° en hiver à 27° en été ; dans les conduites, la température varie de 0° en hiver à 10° en été, avec, pour l'année, une chute moyenne de 17° environ, correspondant à une perte de 5,5 à 5,8 pour 100 de la pression initiale ; de sorte qu'il faut compter sur une réduction de 5 pour 100 du volume de l'air comprimé à la température initiale.

Lorsqu'on fait agir l'air directement sur la surface des eaux à élever, la pression doit être suffisante pour refouler l'eau de la station la plus basse, et, par conséquent, quelquefois très supérieure à la pression nécessaire pour actionner la station la plus élevée ; de sorte que, si l'on emploie à cette dernière station l'air sans le détendre, on perd tout le travail nécessaire pour accumuler dans l'air employé à la station supérieure cet excès de pression. On y dépenserait en outre un excès d'air dans le rapport $\frac{R_1}{R_2}$ des pressions nécessaires aux deux stations limites.

On pourrait, il est vrai, atténuer en grande partie cette perte d'air en réduisant sa pression par un détendeur à la station supérieure, mais non la supprimer entièrement, parce que, en raison du refroidissement par la détente, le volume final de l'air serait égal à $\left(\frac{R_2}{R_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$ fois ce qu'il eût été à la fin d'une détente isothermique.

Il faut nécessairement traiter à part chaque cas particulier de ces applications ; mais on pourra néanmoins se faire une idée de l'effet de ces variations de charges par l'examen d'un système ne comprenant que deux hauteurs de refoulement différentes.

La table IX donne les rapports (A) du travail dans le cylindre à air au travail utilement dépensé au pompage pour deux hauteurs de refoulement différentes et des débits variables. La lettre m désigne les rapports des débits de l'eau pompée aux stations supérieure et inférieure ; les colonnes B donnent les rapports (A) pour de l'air employé sans détente, et les colonnes C pour de l'air avec détente.

TABLE IX.

m	REFOULEMENT MINIMUM 5m,20 REFOULEMENT MAXIMUM 10m;40		REFOULEMENT MINIMUM 10m;40 REFOULEMENT MAXIMUM 20m;80	
	B.	C.	B.	C.
$\frac{1}{4}$	1,19	1,06	1,18	1,09
$\frac{1}{3}$	1,25	1,13	1,23	1,12
$\frac{1}{2}$	1,37	1,19	1,33	1,19
1	1,68	1,35	1,60	1,33
2	2,19	1,63	2,00	1,49
3	2,57	1,80	2,28	1,65
4	2,87	1,92	2,50	1,75

On a calculé le travail du cylindre à air dans l'hypothèse d'une compression isothermique, et les rapports C en supposant une détente parfaite : hypothèses toutes deux irréalisables en pratique. On peut donc prendre comme suffisamment exactes les moyennes des quatre valeurs correspondant à chaque valeur de m. Dans le cas de $m = 1$, correspondant à des débits égaux aux deux refoulements, et le plus probable en pratique, la moyenne des quatre rapports et de 1,49, de sorte qu'il faudrait, dans ce cas, majorer de 49 pour 100 le travail net du pompage, à cause de la différence du refoulement aux deux stations.

Lorsqu'il faut pomper les eaux d'égoûts aussi vite qu'elles se présentent, on doit évaluer le débit maximum moyen de ces eaux par heure, pendant leur période de plus grand débit, au moyen de $\frac{1}{8}$ du débit par jour, et prévoit, pendant ces heures de maximum, des variations d'au moins 25 pour 100 de part et d'autre de cette moyenne. Adoptant ces données, la différence entre les volumes d'air dans le réservoir aux pressions minima et maxima devra être égal au quart (25 pour 100) du débit maximum moyen d'une demi-heure, ou à la 64e partie du débit journalier des eaux. Pour une population de 1000 habitants, à 60 litres par tête, cet excédent par rapport à la moyenne maximum serait de 2mc,200 environ.

Si l'on désigne par V le volume du réservoir, et par P, p les pressions maximum et minimum de l'air, la différence des volumes occupés par l'air à ces deux pressions est de

$$\left(\frac{P}{p} - 1\right)V ;$$

d'où

$$V = \frac{2^{mc},300\,p}{P - p} = 6^{mc},900$$

pour $p = 0,75\,P$, ou $P = 1,34\,p$.

Il faudra donc, afin que la pression maximum nécessaire pour maintenir les égouts constamment libres ne dépasse que de 34 pour 100 la pression minimum nécessaire au refoulement, prévoir un réservoir d'environ 7 mètres cubes par 1 000 habitants, ou de 340 mètres cubes pour une ville de 50 000 habitants.

Lorsqu'on fait agir l'air directement sur la surface des eaux d'égouts, la seule perte du mécanisme est celle occasionnée par l'air libre qui se trouve dans la pompe avant l'admission de l'air comprimé ; on peut réduire à 5 pour 100 la perte provenant de ce fait dans une bonne pompe directe en marche normale.

Le tableau suivant fait connaître les principales pertes qu'il faut ajouter, dans le cas que nous étudions, au travail net du pompage, pour obtenir le travail effectif que l'air comprimé doit produire : ces pertes sont estimées en fonction du travail net du refoulement.

Perte due au frottement des conduites	0,05
id. à l'abaissement de la température de l'air . .	0,05
id. aux variations de refoulement	0,49
id. id. de débit	0,34
id. à l'espace nuisible de la pompe	0,05
Total	0,98

On voit qu'il faudrait, encore tenir compte des pertes accessoires par les fuites ou la marche irrégulière des soupapes, multiplier par 1,98, ou doubler les chiffres de la Table III, pour déterminer les valeurs pratiques du rapport $\frac{IHP}{HP}$ pour l'ensemble d'une installation.

La Table X donne ces valeurs pratiques pour les différentes valeurs de R employées dans les chapitres précédents. Les hauteurs de refoulement données dans cette Table sont équivalentes aux pressions indiquées minima nécessaires aux pompes, et sont, par conséquent, égales aux 0,70 des hauteurs dues à la pression maximum du réservoir, puisque l'on prévoit 5 pour 100 de perte pour la résistance des conduites et 25 pour 100 pour les variations du débit.

TABLE X.

Valeurs de R.	$1\frac{1}{2}$	2	3	4	5	6	8	10	15
Hauteurs du refoulement en mètres.	3,60	7	13,70	20,70	27	34,50	48	62	67
Valeurs moyennes de $\frac{IHP}{HP}$	5	$6\frac{1}{4}$	$8\frac{1}{4}$	$10\frac{1}{2}$	$11\frac{3}{4}$	$13\frac{1}{4}$	$15\frac{1}{4}$	18	22
» pratiques de »	3	4	$4\frac{1}{2}$	$5\frac{1}{2}$	6	$6\frac{1}{2}$	$7\frac{1}{2}$	$8\frac{1}{2}$	10

Ces hauteurs sont égales à la somme de la charge hydrostatique du refoulement et de la hauteur équivalente aux frottements de la colonne montante.

Lorsqu'on emploie comme agent de transmission de force pour le pompage des eaux d'égouts l'eau à haute pression, on n'a pas plus à tenir compte, dans le calcul du travail maximum que doit exécuter cette eau, que du frottement des conduites et du rendement de la pompe actionnée. On pare aux variations de la hauteur du refoulement en modifiant le rapport des diamètres des pistons moteur et plongeur de la pompe de manière à proportionner la puissance de chaque pompe au travail qu'elle doit accomplir. Quant aux variations du débit, on y obvie facilement au moyen d'accumulateurs à pression constante, calculés de manière que le rapport $\frac{IHP}{PH}$ reste invariable, quelles que soient les variations du débit. Ces accumulateurs, très simples (réduits à des cylindres verticaux chargés de poids suffisant pour équilibrer la pression maximum), peuvent être utilisés avec l'eau à haute pression parce que le débit de cette eau varie peu de part et d'autre de sa moyenne. Ce débit n'est, en effet, qu'une faible fraction de celui des eaux pompées, le $\frac{1}{25}$ au plus, de sorte qu'un accumulateur de 100 litres suffirait largement à la variation de débit de $2^{mc},300$ à prévoir pour 1000 habitants : *un accumulateur de* $4^{mc},500$ *suffirait pour une population de* 50000 *âmes.*

L'accumulateur de $4^{mc},500$ dans le cas de l'eau à haute pression, et le réservoir de 340 mètres cubes dans le cas de l'air sont nécessaires pour assurer le fonctionnement automatique parfait des pompes aux stations ; mais, comme on a toujours besoin d'un mécanicien et qu'il peut facilement régler la marche de la pompe en fonction du débit des égouts, il est probable qui'il suffirait, en pratique. pour une population de 50000 habitants, d'un accumulateur de 450 litres ou d'un réservoir d'air de 100 mètres cubes au plus.

L'auteur a inventé et breveté une pompe automatique extrêmement simple. Son fonctionnement automatique est déterminé par les variations de la pression, sous le piston de la pompe, des eaux d'egouts qui lui sont amenées directement ; ce qui constitue un avantage sur les pompes dont la mise en marche et l'arrêt sont déterminés automatiquement au moyen d'un flotteur qui monte ou descend dans le réservoir des eaux d'égouts. Le distributeur qui opère l'admission et l'échappement de l'eau sous pression est un simple piston mû par l'eau sous pression même, admise puis échappée au travers d'orifices auxiliaires ouverts ou fermés alternativement par le piston plongeur et moteur de la pompe, sans aucun emploi de cames ou de taquets. Les figures ci-contre permettront de comprendre facilement la marche de la pompe ; elles représentent une installation de deux pompes de 610 millimètres de diamètre, destinées à fonctionner dans une salle souterraine au-dessous du niveau de la rue.

Les seules résistances de frottement à vaincre avec ce système sont celles des garnitures de la pompe et du cylindre moteur.

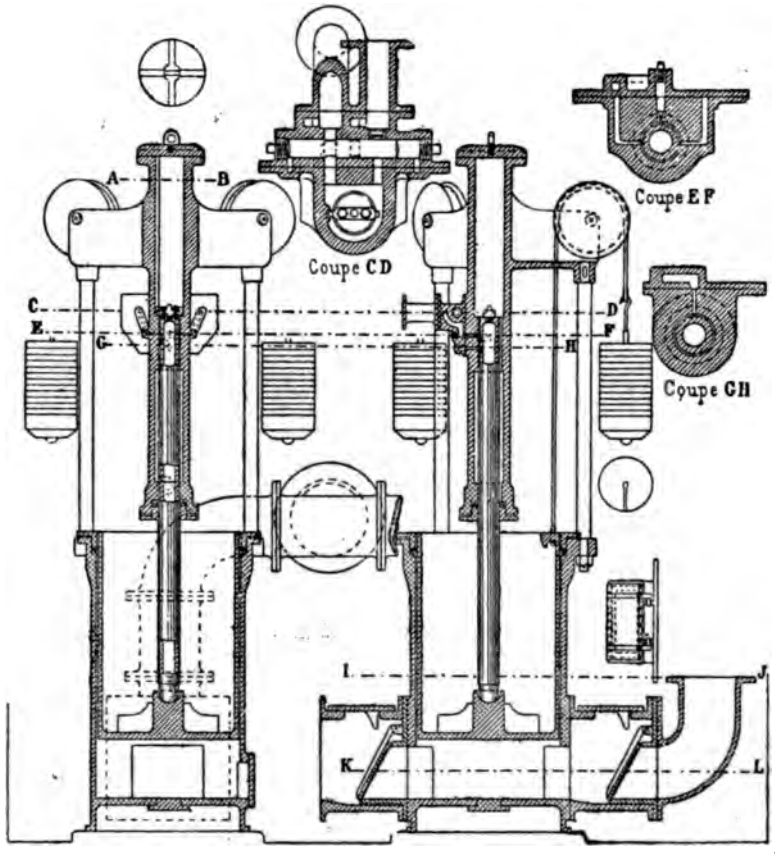
Si l'on désigne par

P et p les pressions de l'eau motrice et de l'eau refoulée ;
D et d les diamètres des pompes motrice et foulante.

POMPE AUTOMATIQUE DES EAUX D'ÉGOUTS

SYSTÈME BREVETÉ DE M. DONALDSON.

$$\frac{\text{Pression dans le cylindre moteur}}{\text{Pression dans la pompe de refoulement}} = 56$$



Coupe OP (*fig.* 2). Coupe MN (*fig.* 2).

FIG. 1.

on a

$$PD^2\left(1-\frac{c}{D}\right)-pd^2\left(1+\frac{c}{d}\right),$$

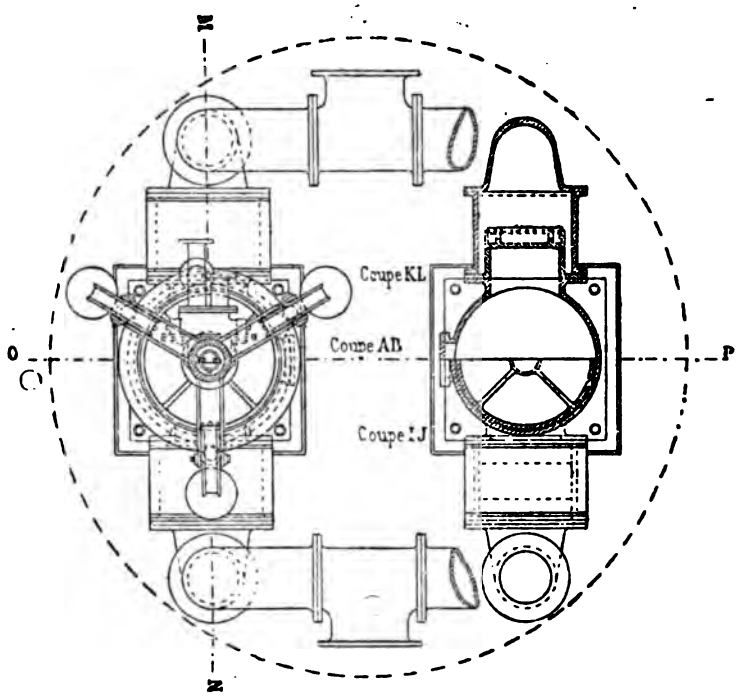


FIG. 2

c étant le coefficient de frottement des garnitures ; d'où

$$D=\frac{c}{2}+\sqrt{\frac{c^2}{4}+\frac{pd\,(d+c)}{P}}.$$

Avec des garnitures en cuir neuf, d'après M. Hick, $c=0{,}6$ (les pressions étant exprimées en livres par pouce carré et les diamètres en pouces) ; d'où, pour D, en pouces, l'expression

$$D=0{,}3+\sqrt{0{,}09\,\frac{pd\,(d+0{,}6)}{P}}.$$

Le rapport du travail effectif de la pompe de refoulement au travail total de la pompe motrice est donné par l'expression

$$\frac{p\,d^2}{PD^2}=\frac{pd^2}{P\left[0{,}3+\sqrt{0{,}09\times\frac{pd\,(d+0{,}6)^2}{P}}\right]}.$$

1. Pour plus de détails sur la pompe de M. W. Donaldson, consulter son ouvrage cité page 249 et les brevets anglais 13820 de 1885, 8165 de 1886.

Le Tableau ci-après donne la valeur de ce rapport pour des diamètres des pompes foulantes d variant de 230 millimètres à 760 millimètres et des rapports de pression $\frac{P}{p}$ variant de 4 à 100, en supposant que le diamètre D du plongeur de la pompe motrice ne soit jamais inférieur à 50 millimètres.

RAPPORT $\frac{P}{p}$	DIAMÈTRES DE LA POMPE FOULANTE d						
	230 mm.	300 mm.	380 mm.	460 mm.	530 mm.	600 mm.	760 mm.
4	0,82	0,85	0,88	0,91	0,92	0,93	0,94
10	0,76	0,81	0,85	0,88	0,90	0,91	0,93
20	0,70	0,77	0,81	0,84	0,86	0,88	0,91
40		0,71	0,75	0,80	0,81	0,84	0,87
60			0,71	0,76	0,78	0,81	0,85
80				0,73	0,76	0,80	0,82
100					0,74	0,77	0,80

Dans la plupart des installations moyennes, le diamètre des pompes foulantes d varie de 380 millimètres à 600 millimètres, et l'on peut facilement donner à la pression maximum des accumulateurs une valeur telle que le rapport $\frac{P}{p}$ ne dépasse pas 20. Dans ces conditions, le rendement des pompes est, en moyenne, de 0,85 ; il s'élève à 0,91 pour $\frac{P}{p} = 4$.

Avec l'eau, la grande difficulté consiste à ne pas étrangler les orifices de distribution, elle a été si complètement vaincue dans notre machine que la perte due à l'action du distributeur ne dépasse guère 2 pour 100 de la charge motrice, et le piston distributeur est néanmoins assez petit pour n'exiger à le mouvoir que 3 pour 100 environ de l'eau motrice totale employée ; de sorte que le travail de distribution ne dépasse pas 5 pour 100 du travail total.

Il résulte évidemment des considérations précédentes que l'on peut établir sur ces données une pompe rendant 80 pour 100 du travail transmis, tandis que la perte dne à la transmission ne dépasse pas 5 pour 100 ; de sorte que le rendement total de l'installation est de 75 pour 100. Si donc nous doublons, comme nous l'avons fait pour une transmission par l'air comprimé, le rapport $\frac{IHP}{HP}$, en le majorant en outre de 25 pour 100 pour la résistance des mécanismes, on obtient dans ce cas, en désignant par HP la puissance actuellement utilisée au refoulement de l'eau, les rapports suivants :

Valeur de sécurité de $\frac{IHP}{HP}$ . . . . . $2\frac{1}{2}$

» pratique minimum » . . . . . $1\frac{1}{2}$

Lorsque le service des eaux d'un district est entre les mains de la municipalité, on peut, s'il ne faut traiter qu'une partie des eaux d'égouts, employer économiquement pour les pomper de l'eau empruntée aux conduites du service, dont le prix de revient réel ne dépasse guère un centime par 450 mètres cubes (un penny par 1000 gallons). S'il fallait pomper la totalité des eaux d'égouts, il faudrait nécessairement installer des appareils spéciaux.

Le prix d'installation des appareils nécessaires pour prodnire l'air ou l'eau sous pression variera dans chaque cas avec la puissance indiquée (IHP) nécessaire pour créer la puissance effective voulue. Les pompes d'eau sous pression, étant beaucoup plus petites que les compressions d'air, coûteront bien moins cher, et les accumulateurs, bien qu'étant, à volume égal, plus coûteux que les réservoirs, seront probablement moins chers d'établissement parce que leur capacité est environ deux fois moindre. Avec l'air, les bâtiments seraient aussi beaucoup plus grands ; tout compte fait, on peut dire, sans favoriser en rien l'eau sous pression, que la dépense d'installation est, dans chaque cas (air et eau), proportionnelle à la pression indiquée (IHP) nécessaire.

Or, dans le cas des eaux d'égouts, on trouve pour le rapport

$$B = \frac{\text{HP nécessaire avec l'air comprimé}}{\text{IHP nécessaire avec l'eau à 56 kilogr. de pression indiquée}}$$

	B.
Avec R = 1,5	2
2	2,75
3	3,5
4	4,25
5	4,75
6	5,50
8	6,25
10	7,25
15	9

Réciproquement, les rapports ci-dessus représentent ainsi les rendements comparatifs de l'eau sous pression, ou les rapports

$$\frac{\text{Rendement de l'eau sous pression}}{\text{Rendement de l'air comprimé}}$$

pour l'application spéciale en question.

L'emploi de l'eau sous pression présente en outre de grands avantages au point de vue hygiénique ou sanitaire. En effet, l'eau motrice ne vient jamais au contact des eaux d'égouts, et ne peut jamais par conséquent en propager les germes morbides : elle reste après son fonctionnement très pure et potable ou, tout au moins, utilisable pour le lavage des rues.

Lorsque l'on fait agir de l'air comprimé directement à la surface des eaux d'égouts à refouler, son emploi pourra ne présenter aucun inconvénient pendant les périodes de débit maximum où l'air s'échappe en une demi-minute ; mais, aux heures de débit minimum, l'air, longtemps au contact des boues d'égouts en décomposition qui tapissent l'intérieur de la pompe, en emportera les germes morbides. On pourra bien faire échapper cet air par des tuyaux de ventilation élevés au-dessus des maisons, mais on ne protégera ainsi que le voisinage immédiat, En tous cas, les dangers de contamination sont, de ce chef, bien moins à craindre avec l'eau sous pression qu'avec l'air comprimé, qui se présente au contact des parois souillées des pompes sous un volume égal au produit du volume de l'eau refoulée par le rapport $\frac{p_1}{p_0}$ des pressions extrêmes.

Lorsque le service des eaux d'un district est entre les mains de la municipalité, on peut, s'il ne faut traiter qu'une partie des eaux d'égouts, employer économiquement pour les pomper de l'eau empruntée aux conduites du service, dont le prix de revient réel ne dépasse guère un centime par 450 mètres cubes (un penny par 1000 gallons). S'il fallait pomper la totalité des eaux d'égouts, il faudrait nécessairement installer des appareils spéciaux.

Le prix d'installation des appareils nécessaires pour prodnire l'air ou l'eau sous pression variera dans chaque cas avec la puissance indiquée (IHP) nécessaire pour créer la puissance effective voulue. Les pompes d'eau sous pression, étant beaucoup plus petites que les compressions d'air, coûteront bien moins cher, et les accumulateurs, bien qu'étant, à volume égal, plus coûteux que les réservoirs, seront probablement moins chers d'établissement parce que leur capacité est environ deux fois moindre. Avec l'air, les bâtiments seraient aussi beaucoup plus grands ; tout compte fait, on peut dire, sans favoriser en rien l'eau sous pression, que la dépense d'installation est, dans chaque cas (air et eau), proportionnelle à la pression indiquée (IHP) nécessaire.

Or, dans le cas des eaux d'égouts, on trouve pour le rapport

$$B = \frac{\text{HP nécessaire avec l'air comprimé}}{\text{IHP nécessaire avec l'eau à 56 kilogr. de pression indiquée}}$$

	B.
Avec R = 1,5	2
2	2,75
3	3,5
4	4,25
5	4,75
6	5,50
8	6,25
10	7,25
15	9

Réciproquement, les rapports ci-dessus représentent ainsi les rendements comparatifs de l'eau sous pression, ou les rapports

$$\frac{\text{Rendement de l'eau sous pression}}{\text{Rendement de l'air comprimé}}$$

pour l'application spéciale en question.

L'emploi de l'eau sous pression présente en outre de grands avantages au point de vue hygiénique ou sanitaire. En effet, l'eau motrice ne vient jamais au contact des eaux d'égouts, et ne peut jamais par conséquent en propager les germes morbides : elle reste après son fonctionnement très pure et potable ou, tout au moins, utilisable pour le lavage des rues.

Lorsque l'on fait agir de l'air comprimé directement à la surface des eaux d'égouts à refouler, son emploi pourra ne présenter aucun inconvénient pendant les périodes de débit maximum où l'air s'échappe en une demi-minute ; mais, aux heures de débit minimum, l'air, longtemps au contact des boues d'égouts en décomposition qui tapissent l'intérieur de la pompe, en emportera les germes morbides. On pourra bien faire échapper cet air par des tuyaux de ventilation élevés au-dessus des maisons, mais on ne protégera ainsi que le voisinage immédiat, En tous cas, les dangers de contamination sont, de ce chef, bien moins à craindre avec l'eau sous pression qu'avec l'air comprimé, qui se présente au contact des parois souillées des pompes sous un volume égal au produit du volume de l'eau refoulée par le rapport $\frac{p_1}{p_0}$ des pressions extrêmes.

TRANSMISSION DU TRAVAIL A DISTANCE

PAR

L'AIR COMPRIMÉ ET L'AIR RARÉFIÉ

CONSIDÉRATIONS PRÉLIMINAIRES. — PRODUCTION DE L'AIR COMPRIMÉ. — — COMPRESSEUR MÉTHODIQUE A PISTON HYDRAULIQUE A COLONNES PARABOLIQUES. — CONDUITES DE TRANSMISSION. — COURBES DE CHANGEMENT DE DIRECTION A VITESSE RALENTIE. — UTILISATION DE L'AIR COMPRIMÉ. — MACHINE RÉCEPTRICE A DÉTENTE A SOUPAPES RÉGULATRICES. — DISPOSITIF A CYLINDRES COMPOUND POUR LES TREUILS EMPLOYÉS DANS LES TRAVAUX SOUTERRAINS.

par M. G. HANARTE

INGÉNIEUR CIVIL DES MINES

L'air comprimé est et restera, croyons-nous, le mode le plus économique pour la transmission du travail à longue distance. C'est qu'en effet, par son emploi judicieux, la perte par les conducteurs est excessivement faible et le rendement des machines très élevé, surtout si l'ou utilise l'air à détente sur les machines réceptrices (1).

Dans les travaux souterrains des tunnels et des mines, ce mode de transmission est surtout avantageux, puisqu'il procure aux chantiers de travail, non-seulement une force économique, mais encore une atmosphère renouvelée et rafraîchie qui permet d'obtenir des travailleurs un effet utile maximum.

Dans les villes, outre la transmission de la force, les conduites d'air comprimé permettent, par des moyens très simples, la production à domicile du froid artificiel pour le refroidissement des celliers et la ventilation des locaux.

Depuis quelque temps, un autre mode de transmission du travail par l'air a été employé ; nous voulons parler de l'emploi de *l'air raréfié* dont une remarquable application a été faite à Paris par MM. Boudenoot et Petit.

1. Théorie et Calculs faits pour la production et l'utilisation de l'air comprimé. — Mons, 1879. Dacquin, éditeur.

Nous avons démontré, dans un mémoire publié il y a quelques années (1), que l'air raréfié, quoique présentant certains avantages, surtout pour la transmission du travail à domicile, pour la petite industrie dans un rayon très limité, doit être absolument rejeté lorsqu'il s'agit de transmettre la force à de longues distances. C'est que la perte par les conducteurs à cause de la vitesse qu'il faut donner au fluide, est beaucoup plus importante, et que les machines productrices et réceptrices doivent avoir des dimensions beaucoup plus considérables. Quoi qu'il en soit, dans les deux modes de transmission, l'appareil de transformation du travail est identique. Pour l'air comprimé, le compresseur aspire l'air atmosphérique, le comprime à la tension voulue et le refoule dans un réservoir, d'où il va dans les conduites. Pour l'air raréfié, le compresseur aspire l'air dans une conduite sur laquelle sont branchées les décharges des machines travaillant avec l'air atmosphérique, le comprime jusqu'à la densité de l'atmosphère pour le rejeter ensuite dans celle-ci. L'atmosphère est le réservoir à air comprimé, et la conduite contient l'atmosphère raréfiée qu'il s'agit de comprimer.

Dans les deux cas, le bon fonctionnement de l'appareil repose sur les mêmes principes théoriques que nous allons rappeler très brièvement, surtout qu'ils ont été complètement méconnus dans la construction de certains compresseurs exposés dans la galerie des machines de l'Exposition universelle de 1889.

Cette exposition des principes théoriques nous donnera l'occasion, au moyen de diagrammes relevés sur ces compresseurs à air, de montrer quelle énorme influence peut avoir dans la pratique la plus où moins complète application de ces principes.

CONDITION PRINCIPALE QUE DOIT REMPLIR UN COMPRESSEUR D'AIR

Chacun sait que lorsque l'on réduit le volume de l'air, celui-ci oppose à sa compression une résistance qui provient, d'après Clausius, d'une diminution brusque de l'amplitude des mouvements vibratoires dont sont animées les molécules du gaz, même à l'état de repos apparent. Ces vibrations produisent alors des chocs d'où naît la chaleur. Les expériences de Graham et de Crookes semblent avoir démontré matériellement la justesse de cette manière de voir.

Si l'on comprime un volume V_0 d'air de la tension absolue p_0, à la tension p, tout le travail absolu de la compression proprement dite est converti en chaleur.

1. L'air raréfié. — Théorie et Calculs faits pour sa production et son utilisation. (Extrait de la *Revue universelle des Mines*). — Mons, 1886. Dacquin, éditeur.

Ce travail absolu se compose : 1° du travail effectif fourni par le moteur $x\,x'\,o$ dont l'expression est $p_0\,V_0\,loy\,hyp\,\frac{p}{p_0} - p_0\,V_0\left(1 - \frac{p_0}{p}\right)$

2° Du travail adjuvant de l'atmosphère le long du chemin ox', qui a pour valeur $p_0\,V_0\left(1 - \frac{p_0}{p}\right)$

La quantité totale de chaleur qui se dégage pendant la compression peut donc s'exprimer en calories par

$$\frac{p_0\,V_0\,log\,hyp\,\frac{p}{p_0}}{424}$$

(1) 424 étant l'équivalent mécanique en kilogrammètres de la calorie. Si cette chaleur est enlevée au fur et à mesure qu'elle se dégage, la compression a lieu

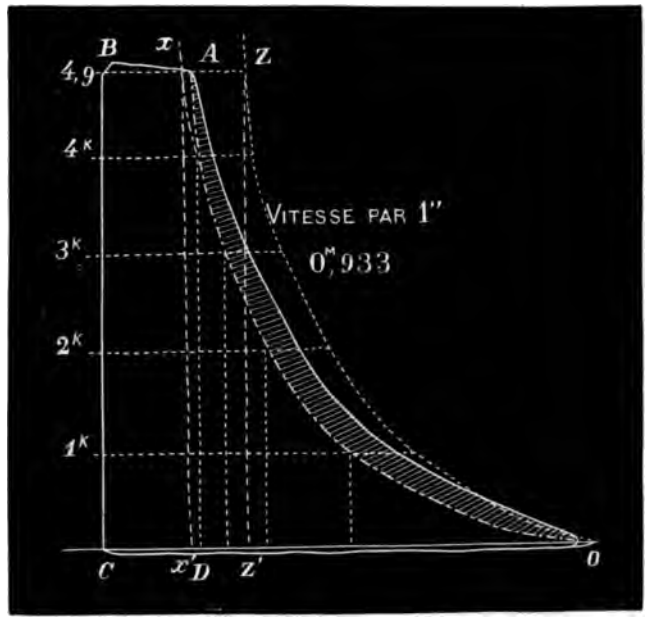


FIG. 1.

suivant la courbe isothermique ox et le refoulement de l'air dans le réservoir d'air s'effectue avec un minimum de travail. Ce travail minimum est représenté sur le diagramme (fig. 1) par le rectangle B x x' C ; il a pour valeur :

$$p_0\,V_0\,(1 - \frac{p_0}{p}).$$

(1) Si l'on adopte : $\frac{1}{273}$ comme coefficient de la dilatation de l'air.
C = 0cal,2377, capacité calorifique à pression constante.
C_1 = 0cal,1688 capacité calorfique à volume constant.

et il s'effectue sans variation de température. Il est bon de noter, pour éviter toute confusion, que ce travail du refoulement dans le réservoir est égal et a a même expression que le travail adjuvant de l'atmosphère pendant la compression.

Ceci explique comment l'expression du travail effectif à fournir par le moteur pour comprimer et refouler l'air dans le réservoir est égal à celle du travail absolu de la compression proprement dite converti tout entier en chaleur :

$$p_0 V_0 \log hyp. \frac{p}{p_0}.$$

Si la chaleur reste toute entière dans le cylindre pendant la compression, celle-ci a lieu suivant la courbe *oz* dite adiabatique, et exige un travail supplémentaire *o x z*.

La température initiale absolue de l'air t_0 devient : $t = t_0 \frac{p}{p_0}^{0,29}$;

Le volume à refouler dans le réservoir devient B Z Z' C au lieu de B *x x'* C, de là la perte de force motrice.

Suivant quelle loi un compresseur doit-il opérer le refroidissement de l'air pour éviter cette perte de force motrice et obtenir la compression isothermique ?

Il est évident que la chaleur dégagée croît comme les logarithmes hyperboliques de $\frac{p}{p_0}$.

Supposons un compresseur de un mètre cube de capacité, ayant 1 mètre de longueur de course utile *o c* dans lequel on comprime l'air à la pression de 4 kil. 9, soit 5,9 atmosphères absolues.

La chaleur totale dégagée pendant la compression sera de

$$\frac{10333 \times 1^{m3} \times \text{log. hyp. de } 5,9}{424} = 43^{cal},254$$

qui se dégageront pendant les diverses phases de la compression comme l'indique le tableau ci-après.

p_0 la pression atmosphérique = 10333 kilogrammes par mètre carré.
V_0 le volume d'un kilogramme d'air à 0° = 0m3,813700.
L'on tire de l'équation

$$C - C_v = p_0 \times \frac{1}{273} \times V_0$$

1 calorie = 424 kilogrammètres

et non pas 425 kilogrammes comme l'indiquent erronément certains auteurs qui admettent cependant la même valeur des deux facteurs de l'équation ci-dessus.

C_I a été déduit par expérience.

C n'a pu être mesuré directement. La Place est le premier qu en ait fixé la valeur en la déduisant de la théorie du son. Les expériences de Joule ont confirmé expérimentalement l'exactitude de cette déduction.

COMPRESSION en kilogrammes	CHEMIN PARCOURU d'après la loi de Mariotte	CALORIES dégagées d'une atmosphère à l'autre	CHALEUR MOYENNE à enlever par millimètre de chemin parcouru
de 0 à 1^k	$\left(1-\frac{1}{2}\right)1^m=0^m.500$	16.89	0.033
1 à 2^k	$\left(\frac{1}{2}-\frac{1}{3}\right)1^m=0^m,167$	9.41	0.056
2 à 3^k	$\left(\frac{1}{3}-\frac{1}{4}\right)1^m=0^m,083$	7.48	0.089
3 à 4^k	$\left(\frac{1}{4}-\frac{1}{5}\right)1^m=0^m,050$	5.42	0.108
4 à $4^k,9$	$\left(\frac{1}{5}-\frac{1}{5,9}\right)1^m=0^m,031$	4.054	0.130

Les moyens de refroidissement des compresseurs pour être méthodiques et efficaces doivent donc croître au fur et à mesure que la tension s'élève. En effet, la chaleur dégagée dans l'exemple ci-dessus, est 4 fois plus intense dans l'unité de temps pendant la dernière période de la compression qu'à son origine.

Ce tableau indique encore, en montrant la rapidité avec laquelle la chaleur se dégage *la mesure qu'il faut garder dans la vitesse à donner aux appareils compresseurs.*

ESSAIS COMPARATIFS FAITS SUR DES COMPRESSEURS POSSÉDANT DES MOYENS DE REFROIDISSEMENT PLUS OU MOINS PARFAITS

Le compresseur, dont nous donnerons la description au chapitre suivant, réalise comme on le verra, le *refroidissement méthodique*, par un moyen aussi simple qu'il est efficace.

Aussi la courbe de compression AO relevée sur un semblable appareil, établi aux mines de Blanzy, se rapproche-t-elle autant que possible de la courbe isothermique xO.

La partie hachée montre l'excédent de travail dû à l'échauffement.

L'effet toujours croissant du refroidissement est parfaitement indiqué par la faible différence que présente le volume final dû à l'isothermique, et le volume dû à cette compression. Cette différence est indiquée par le rectangle A$x x'$D.

Le rapport entre les surfaces CBxO et CBAO est = 1 : 1,11.

C'est-à-dire que l'effet utile de l'appareil = 90 %.

Si l'on appelle V_0 le volume du cylindre et V le volume de l'air après sa compression, t_0 la température absolue de l'air primitivement à 20° C + 273 après sa compression devient :

$$t = t_0 \frac{V}{V_0} \frac{p}{p_0} = 46°C + 273.$$

Il est curieux de comparer ces résultats avec ceux indiqués sur le diagramme ci-contre (fig. 2) relevé sur un nouvel appareil installé également aux mines de Blanzy [1].

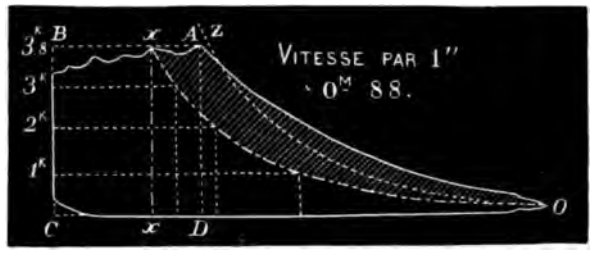


FIG. 2

Ce compresseur consiste en un appareil à tiroirs. Ses moyens de refroidissement sont constitués par une circulation d'eau autour du tiroir et de la chapelle de distribution.

Le rapport entre les surfaces CBxO et CBAO est comme 1 : 1,39

C'est-à-dire que l'effet utile de l'appareil descend à 71,8 %, nonobstant une vitesse plus faible que celle du compresseur dont nous venons d'examiner les résultats.

La température primitivement à 20° C de l'air ambiant y devient de 151° C.

Le diagramme présente cette particularité que sa courbe de compression AO est au-dessus et traverse seulement vers la fin de la compression la courbe adiabatique ZO.

Cette particularité est certainement une anomalie qui vient de ce que nous avons tracé l'adiabatique en supposant que l'air au commencement de la compression possédait la température ambiante.

Or le résultat du tracé indique clairement que l'air prend déjà à l'aspiration une température résultant de l'emmagasinement de la chaleur dans le métal du compresseur. Pour tracer l'adiabatique réelle il serait donc indispensable de con-

1. Ce diagramme est extrait de la brochure *L'air comprimé aux mines de Blanzy*, PLVI compresseur A n° 5, par F. Mathet, ingénieur en chef des mines de Blanzy, Saint-Étienne, Imp. Théolier et Cie.

naître la température qu'acquiert l'air avant sa compression c'est-à-dire pendant la période d'aspiration.

Il résulte de notre comparaison que cet appareil pour produire 100 chevaux de compression utile exige, par le fait seul du refroidissement inefficace de l'air, 140 chevaux environ tandis que notre appareil n'en exige que 111.

D'autre part un tel appareil fonctionnant à sec et produisant de l'air à la température de (151° C) volatilise le lubrifiant dont la quantitè employée doit affecter singulièrement le coût de son fonctionnement.

Nous allons voir, dans ce qui va suivre, que l'appareil auquel nous avons donné la préférence présente encore au point de vue du rendement volumétrique des avantages marqués, résultant de son étanchéité parfaite, sur les appareils à sec, qui après quelque temps d'usage laissent facilement repasser l'air à travers le piston dont l'entretien par cela même exige des soins continuels.

DU COMPRESSEUR A PISTON HYDRAULIQUE A COLONNES PARABOLIQUES

L'ingénieur Sommeiller qui créa, pour ainsi dire, tous les instruments du gigantesque travail de la traversée des Alpes au Mont-Cenis est le premier qui ait réellement appliqué l'air comprimé à la transmission du travail à distance.

Après bien des essais sur les compresseurs à sec jusqu'alors en usage pour le creusement des puits et des piles de pont, il adopta pour produire l'air comprimé l'appareil à piston hydraulique qui porte son nom et dont l'idée avait été émise, dès 1841, par l'ingénieur français Sorel [1].

Ce compresseur consiste en deux vases communiquants, cylindriques, reliés entre eux par un cylindre horizontal de même diamètre dans lequel se meut un piston complètement noyé.

Ce piston dans sa course, abaisse et élève dans les colonnes une nappe d'eau qui aspire et comprime l'air.

L'étanchéité du piston, ainsi complètement obtenue et la suppression entière des espaces nuisibles, procurent un bon rendement sans entretien notable. *Le refroidissement de l'air a lieu d'une manière très simple par les nappes comprimantes et les parois relativement considérables des colonnes et des cylindres*, parois qui sont constamment humectées et rafraîchies.

Malheureusement l'appareil ainsi constitué ne pouvait guère marcher efficacement à plus de 14 tours. Au-delà de cette vitesse les moyens de refroidissement devenaient insuffisants et la vitesse communiquée à l'eau faisait diminuer singulièrement le rendement volumétrique de l'appareil, et menaçait même la sécurité de sa marche.

1. Comptes-rendus de l'Académie des sciences, Tome XIII, p. 1033.

Dans le but de parer à ces inconvénients, c'est-à-dire de pouvoir augmenter la vitesse possible de l'appareil et éviter ainsi les frais d'une immobilisation coûteuse de matériel, M. François, ingénieur à l'entreprise du tunnel du Mont Cenis, imagina de réduire le volume des colonnes du Sommeiller. L'appareil ainsi modifié n'a plus son piston complètement noyé et étanche. L'air voyageant horizontalement sur l'eau enlève celle-ci dans la marche à grande vitesse en faisant diminuer considérablement le rendement volumétrique.

Le savant Colladon dans le même but supprima complètement les colonnes. Il en revint aux appareils à sec et chercha à obtenir le refroidissement dans la marche à grande vitesse par la circulation d'eau autour des cylindres et l'injection d'eau à l'intérieur. Après un examen approfondi des résultats pratiques donnés par ces appareils et par de nombreux types imaginés depuis et dérivés de ceux-là, nous avons acquis et nous conservons plus que jamais la conviction de la supériorité du piston hydraulique pour la compression de l'air.

Il est, selon nous, le seul dispositif qui puisse procurer l'étanchéité complète du piston et la suppression des espaces nuisibles sans entretien.

Nous nous sommes donc appliqués à perfectionner l'appareil hydraulique primitif, de façon à pouvoir, en augmentant sa vitesse, augmenter proportionnellement ses moyens de refroidissement, et par conséquent lui conserver, dans ces conditions son grand effet utile.

Nous y sommes arrivés par un moyen d'une simplicité élémentaire qui constitue, selon nous, la solution vraiment rationnelle de la compression du gaz. (Voir la fig. 3.)

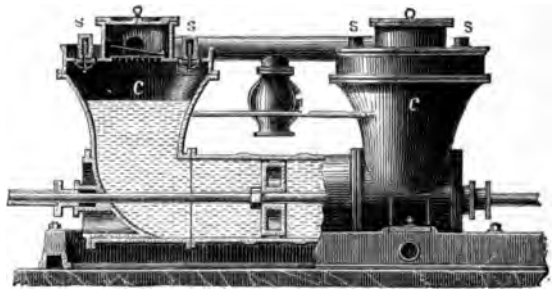


FIG. 3.

L'air, au lieu d'être comprimé par des nappes d'eau de section uniforme dans des colonnes cylindriques, l'est par des nappes à section croissante qui, se renouvelant constamment rafraîchissent, l'air de plus en plus en s'élevant dans des colonnes évasées CC à profil rigoureusement parabolique [1]. Ainsi est obtenu le

1. Il est facile de démontrer théoriquement que la forme parabolique est la forme rationelle pour que la diminution de la vitesse de l'eau soit uniforme et la marche régulière. (Voir fig. *a*)

refroidissement méthodique qu'aucun autre système ne peut réaliser aussi efficacement.

Dans cette disposition, tous les organes: les soupapes SS d'aspiration et le clapet de refoulement sont placés sur le dessus de ces colonnes paraboliques, à portée de la main et ne s'opposent plus à la marche de la nappe liquide.

Supposons que A M soit la génératrice supérieure du cylindre dans lequel se meut le piston du compresseur et B K l'élargissement maximum de la colonne évasée. Supposons encore qu'une molécule d'eau placée en A, poussée par le piston, monte en ligne droite vers B, siège du clapet de refoulement, avec une vitesse uniforme v, au bout d'un temps t, elle aurait parcouru l'espace AB$=vt$. Mais, comme l'augmentation de section a pour effet de diminuer la vitesse du fluide, considérons cet évasement comme une force constante qui sollicite la molécule A supposée à l'état de repos vers le point M d'un mouvement uniformément accéléré.

Cette force, que nous appellerons R, ferait parcourir l'espace AM en un temps t d'où la relation

$$AM = \frac{IR}{2m} t^2$$

m étant la masse de la molécule.

En réalité, les deux causes, la vitesse initiale et la force constante retardatrice due à l'évasement, agiront ensemble. Au bout du temps t, la molécule de masse m sera en K. En sorte qu'en nommant x et y les coordonnées du point ou molécule qui se meut parallèlement à AB et AM, l'on aura pour toutes les valeurs de x et de y

$$y = vt \quad \text{et} \quad x = \frac{1R}{2m}$$

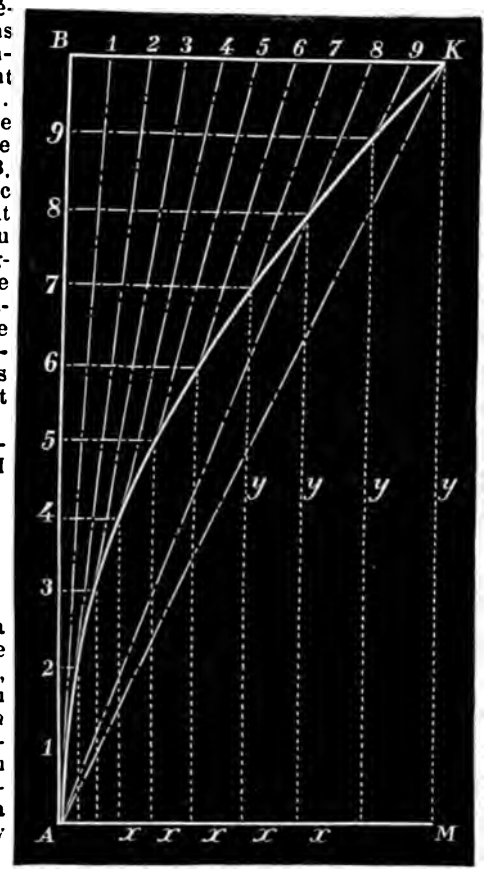


FIG. *a*

Pour avoir l'équation de la courbe suivie par la molécule, remplaçons t par sa valeur en faisant

$$y = v^2 t^2 \quad \text{d'où} \quad t^2 = \frac{y}{V^2}$$

nous aurons :

$$x = \frac{1Ry^2}{2mV^2}$$

D'où

$$y^2 = \frac{2mV^2}{R} x$$

Outre le refroidissement uniformément croissant de l'air, l'évasement parabolique procure la diminution uniforme de vitesse de la nappe comprimante qui arrive au clapet de refoulement sans chocs, nonobstant une grande vitesse du piston. Le problème de la marche du piston hydraulique à une vitesse normale convenable égale à celle des autres compresseurs, est donc aussi résolu .

La diminution de vitesse de la nappe comprimante a lieu en vertu du principe de l'égalité de pression comme dans la presse hydraulique.

La pression p, s'exerçant sur le piston de surface M, marchant à une vitesse v par I", produit un travail pMv qui se transmet jusqu'à l'évasement de surface nM en se transformant en $pnM\frac{v}{n}$.

La forme parabolique, que nous avons substituée à la forme cylindrique de grand diamètre, que nous avions employée tout d'abord, permet de diminuer la quantité d'eau et assure un passage de la vitesse v à la vitesse $\frac{v}{n}$ sans perturbation et sans remous.

Ce qu'indique du reste la régularité du diagramme ci-contre (fig. 4), pris à la vitesse de 35 à 40 tours au charbonnage du Bois-du-Luc.

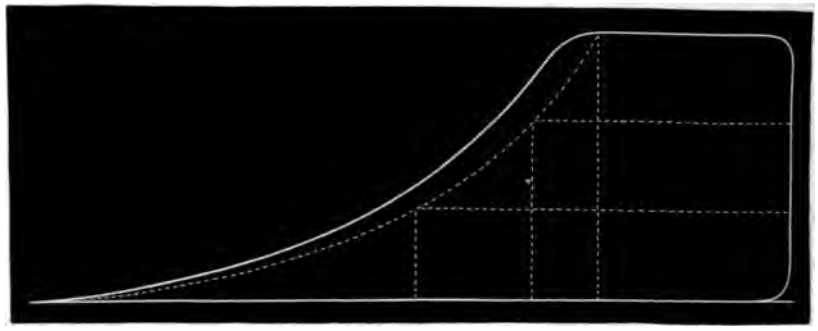


FIG. 4

Ce diagramme montre que le refroidissement méthodique procure un rendement de 95 %.

Si l'on compare ce diagramme à celui relevé en même temps sur le cylindre à vapeur, marchant à la pression de 3 kilogrammes aux chaudières l'on trouve

équation d'une parabole rapportée à une tangente AB, qui est la direction initiale, et à un diametre AM passant par le point du contact.

Cette forme parabolique de l'évasement que les considérattions théoriques qui précèdent ont fait adopter a donné en pratique des résultats tout à fait concluants et infiniments supérieurs à ceux fournis par la forme conique.

Le lecteur comprendra aisément que la forme parabolique est également le tracé rationnel de la cheminée des ventilateurs, des tuyères d'injecteurs et d'éjecteurs, des tuyaux d'émission du son, etc., etc. La surface comprise entre la courbe et la ligne pointillée AK peut être considérée comme la représentation des remous qui se produisent avec la forme conique ordinaire.

que le rendement de l'installation dépasse 87 %. (Voir diagramme, fig. 5. Ressort à $0^m,018$ par kilogramme).

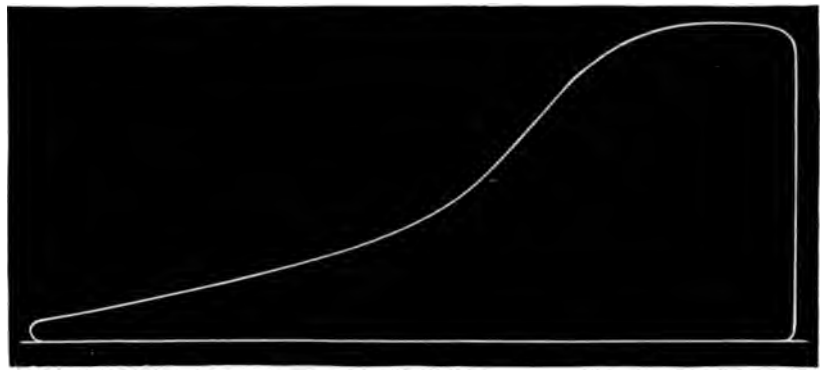


FIG. 5

Dans nos diverses installations de l'appareil, nous avons maintes fois constaté que le travail utile de compression à 5 kilogrammes, suivant l'isothermique, était au travail brut indiqué dans le cylindre à vapeur, comme 1 : 1,20.

Les dispositions (fig. 3 et 6) montrent les dispositions horizontales adoptées pour la production de l'air comprimé dans les grandes installations des houillères. Ces installations sont généralement à deux cylindres.

FIG. 6

Les figures 7 et 7bis montrent les dispositions verticales du système à simple et à double effet.

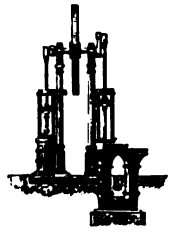


FIG. 7

FIG. 7 *bis*

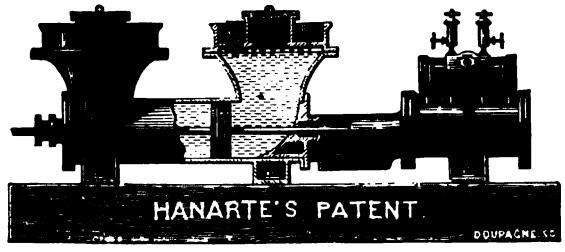


FIG. 8

La disposition (fig. 8), à traction directe sans volant, permet d'installer en peu d'instants une forte installation d'air comprimé dans un espace très exigu. L'appareil, qui n'exige ni fondations, ni machinistes, est principalement employé dans les travaux publics.

Enfin, la figure 9 montre la disposition adoptée pour la production de l'air

raréfié. Elle ne diffère de celle adoptée pour la compression de l'air que parce qu'elle est munie de collecteurs V et D.

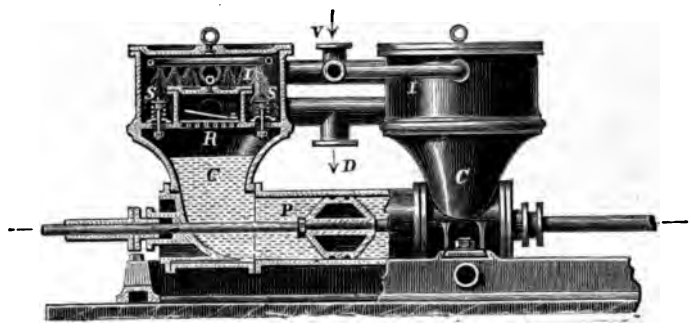


FIG. 9

Cette disposition est aussi employée dans la *production du froid par les gaz :* ammoniac et acides sulfureux et carbonique. L'appareil est alors rempli d'huile au lieu de l'être par de l'eau. Dans cette application, l'appareil est fixé dans une bâche à eau jusqu'à la hauteur de la partie cylindrique des colonnes. Les stuffing-box sont d'une étanchéité parfaite, et le refroidissement pendant la compression est en partie obtenu, grâce aux parois très développées de l'appareil entièrement plongé dans l'eau.

Ce dispositif est encore employé comme *condenseur à pompe à air* pour les machines à vapeur. Dans cette application, l'appareil permet d'obtenir un vide à peu près parfait dans la marche à grande vitesse, et procure une condensation très régulière avec une quantité moindre d'eau que les condenseurs ordinaires.

DES CONDUITES DE L'AIR COMPRIMÉ ET DE L'AIR RARÉFIÉ CALCUL DE LA PERTE DE CHARGE COUDES DE CHANGEMENT DE DIRECTION A VITESSE RALENTIE

Les différents expérimentateurs et auteurs qui ont traité des pertes de charge ont donné la formule ordinaire

$$y = \beta L \frac{Q^2}{D^5}$$

pour le calcul de la perte de charge dans une conduite de longueur L de diamètre D et avec un débit Q.

Le cofficient β, variant d'après les expérimentateurs, M. Stockalper, après des expériences exécutées au grand tunnel de Saint-Gothard, sur des conduites de 4 à 5000 mètres, et avec des régimes de vitesses différentes, a formulé la perte

de charge due à l'écoulement de l'air comprimé d'une façon plus générale encore [1].

Il applique la formule ci-dessus à tous les fluides, gaz et liquides, avec le même coefficient $\beta = 0{,}0025$ pour les conduites en fer ou en fonte en service courant, en exprimant y en mètres du fluide considéré.

Il est évident que cette manière d'envisager la question est essentiellement irrationnelle, puisqu'elle ne tient pas compte des variations du volume du gaz qui se déprécie en cheminant.

En un mot, l'air ne peut pas être considéré comme un fluide incompressible; son volume doit grandir au fur et à mesure qu'il chemine et qu'il perd de sa pression initiale.

En attendant que la formule rationnelle soit établie, il sera bon, surtout pour l'air raréfié, de n'appliquer la formule que par tronçons du parcours dont on veut déterminer la perte de charge, en tenant compte de l'augmentation de volume de l'air après chaque tronçon pour calculer la perte de charge du tronçon suivant.

La faible densité de l'air raréfié, et par conséquent la grande vitesse qu'on doit lui faire prendre pour produire un travail de quelque importance, oblige, en effet, à prendre des précautions spéciales pour éviter les pertes de charges excessives. Aux changements de direction, où la perte de charge pour un angle α a l'expresssion :

$$y^2 = \left(0{,}9457 \frac{\sin^2\alpha}{2} + 2{,}0475 \frac{\sin^4\alpha}{2}\right)\frac{V^2}{2g}$$

nous proposons de diminuer la vitesse V de l'air en augmentant la section du coude à la bissectrice de l'angle de déviation. Pour une section double, la résistance au passage du fluide sera quatre fois moindre.

Cette augmentation de section doit se faire insensiblement, par deux évasements paraboliques, se raccordant suivant la ligne zz (fig. 10)

Comme le montre la figure ci-contre, l'augmentation de section a lieu à l'extérieur de la courbe suivant la ligne bza.

Le pointillé montre la courbe ordinairement employée.

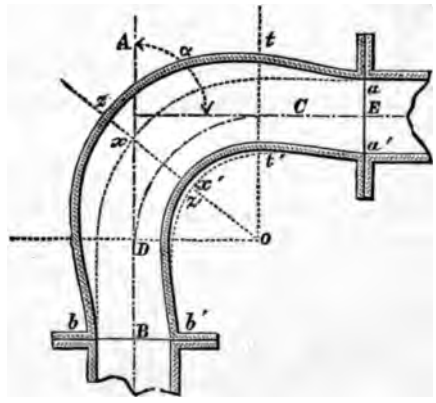


FIG. 10

1. *Écoulement de l'air comprimé.* — Genève, Ch. Schuchardt, 1879.

Cette disposition des coudes, là où les changements de direction doivent être multipliés, nous a rendu également de grands services dans l'établissement des conduites de vapeur, des conduites d'eau et d'air comprimé.

UTILISATION DE L'AIR COMPRIMÉ MACHINES RÉCEPTRICES A DÉTENTE COMPOUND A SOUPAPES RÉGULATRICES

Nous avons vu que tout le travail absolu de la compression de l'air est transformé en chaleur et dispersé dans l'espace ; qu'il n'y a d'emmagasiné dans l'air comprimé que le travail du refoulement $p_0\, v_0 \left(1 - \frac{p_0}{p}\right)$ restituable à pression pleine sur la machine réceptrice sans variation de température.

Si la machine réceptrice n'utilise que l'air à pleine pression, le rendemen théorique de la transmission du travail à distance par l'air comprimé qui est indépendant de la perte par les conducteurs et par les frottements des appareils, est fixé par le rapport

$$\frac{\log \text{nep} \frac{p}{p_0}}{1 - \frac{p_0}{p}}$$

C'est-à-dire que pour les différentes valeurs de p (pression absolue de l'air comprimé) : 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8. 9. 10 atmosphères, le rendement est respectivement les 0,72 — 0,61 — 0,54 — 0,49 — 0,46 — 0,44 — 0,42 — 0,40 — 0,39 du travail dépensé. — C'est le rendement que l'on obtient d'ordinaire sur les perforatrices et les treuils employés dans les tunnels et les mines.

Tout le travail représenté par la chaleur dégagée pendant la compression est ainsi perdu.

Si, au contraire, on veut profiter du potentiel que l'on a communiqué à l'air par la compression, en le faisant agir à détente sur la machine réceptrice sans lui communiquer de chaleur, il travaillera aux dépens de sa chaleur interne. L'air sera contracté, la détente aura lieu suivant une adiabatique en produisant un *minimum de travail.*

Ce minimum de travail ne pourra pas même être continué par suite de la congélation de l'eau qui sature l'air.

Pour pouvoir récupérer complètement le travail qu'a nécessité la compression et obtenir un rendement intégral $= 1$, il faut donner à l'air une quantité de chaleur telle que sa température reste constante pendant la compression qui aura lieu alors suivant la courbe isothermique.

Le réchauffement de l'air, pour être méthodique, c'est-à-dire fournir la courbe isothermique de détente, devrait être maximum au commencement de celle-ci et décroître proportionnellement à la succession des logarithmes népériens de $\frac{p}{p_0}$.

Pour détendre complètement un mètre cube d'air à la pression initiale $p = 10$ atmosphères absolues, il faudrait, pour une course de piston de 1 mètre, donner comme chaleur par millimètre de chemin parcouru en moyenne d'une atmosphère à l'autre, les quantités respectives de 0,235 — 0,205 — 0,185 — 0,157 — 0,133 — 0,108 — 0,0897 — 0,056 — 0,033 calories.

Dans le cas d'une transmission du travail par l'air comprimé ou l'air raréfié dans l'intérieur des villes, il est facile d'obtenir à peu de chose près la détente isothermique de l'air et par conséquent le maximum de rendement en chauffant l'air avant ou pendant le travail, au moyen d'un foyer à coke à gaz ou aussi par la vapeur.

Le calorique ainsi communiqué à l'air est immédiatement utilisé en force motrice. Il est facile de calculer dans quelle mesure il affecte le coût de l'air comprimé ou de l'air raréfié.

En supposant au calorifère un rendement de 50 %, nous avons calculé que pour l'air atmosphérique travaillant à $\frac{5}{8}$ de pression effective atmosphérique, la dépense en houille donnant 7500 calories par kilogramme, était de 0 kil. 086 par cheval et par heure, et que pour l'air comprimé à la pression de 4 kilogrammes cette dépense était de 0 kil. 395.

Dans l'intérieur des mines où tout foyer est proscrit, l'on ne peut guère obtenir le réchauffement de l'air que par la chaleur géothermique. Les premiers essais furent produits au moyen de l'hydratation de la chaux. Vinrent ensuite les tentatives de M. Cornet au moyen de l'eau pulvérisée. Nous pensâmes, dès 1879, de détendre l'air sur des nappes d'eau comme dans la compression de l'air. Mais ces divers dispositifs étaient trop compliqués pour l'intérieur des mines où l'on recherche avant tout la simplicité et la compacité des appareils, et nous transformâmes, en 1886, notre appareil à deux cylindres à nappes réchauffantes et à soupapes régulatrices en appareil à deux cylindres compound ordinaires, munis des mêmes soupapes.

Dans cette disposition nous donnons au cylindre de détente des dimensions en rapport avec la pression initiale de l'air, mais assez grandes pour que la détente soit complète.

Si, par suite d'un refroidissement trop grand, la pression atmosphérique était atteinte avant la fin de la course, l'air atmosphérique pénètrerait automatiquement dans le cylindre par des soupapes dites régulatrices s'ouvrant du dehors au dedans, et par lesquelles il est facile d'introduire en même temps un peu d'eau, si c'est nécessaire.

L'influence des parois et la chaleur pénétrant dans l'intérieur du cylindre par les soupapes, suffisent pour assurer le bon fonctionnement de cette disposition que nous avons mise le premier en usage et qui a été appliquée depuis dans certaines exploitations houillères.

Dans les installations de la surface, ces soupapes peuvent être reliées à un calorifère de réchauffement.

L'application de ce dispositif au treuil des mines permet d'employer l'air comprimé à détente complète avec une pression initiale de 4 kilogrammes, sans avoir à craindre la production du givre. L'appareil est construit de façon à pouvoir, à volonté, employer, avec une même pression, l'air à pression pleine dans les deux cylindres lorsque l'on veut démarrer ou effectuer un travail plus considérable que le travail normal.

NOTE

SUR UN

SYSTÈME DE POMPE A TUYÈRES CONVERGENTES & DIVERGENTES

dite Pompe à épanouissement parabolique

APPLICATION AUX COURBES DE CHANGEMENT DE DIRECTION
ET AUX CONDENSEURS A POMPE A AIR

PAR

G. HANARTE
INGÉNIEUR CIVIL DES MINES

CONSIDÉRATIONS PRÉLIMINAIRES

Avant de procéder à la description du système nous croyons utile, tout d'abord, de faire part au lecteur de différents essais [1] exécutés à la Société des Mines et Usines du Grand-Hornu, près Mons, sur une pompe à épanouissement parabolique.

La pompe d'expérience avait les dimensions suivantes :

Cylindre à vapeur.	153	millimètres.
» à eau.	76	»
Course commune	305	»

1° Cet appareil a pu marcher, sans chocs ni coups de bélier, à la vitesse de 400 tours par minute, avec de l'eau ayant une température de 70° centigrades ;

1. Ces essais ont été faits en présence de MM. Plumat, ingénieur principal des Mines du Grand-Hornu; Ch. Demanet, Directeur des Mines d'Havré; Léon François, Ingénieur principal des Mines de Rieu-du-Cœur, à Quaregnon; D. Doye et Daubresse, Ingénieurs des Ateliers de Construction du Grand-Hornu.

2° Les essais sur le débit ont été faits à la vitesse normale de 200 tours, soit 400 coups par minute, avec de l'eau à la même température :

a) Avec une colonne de refoulement de quelques mètres (2 à 3 mètres) la pompe a fourni un volume d'eau de 1/10 supérieur au volume théorique engendré par le piston ;

b) Avec un refoulement de 30 mètres, le débit net était égal au volume théorique ;

c) Avec un refoulement de 60 mètres, la pompe fournissait 92 % du volume théorique.

Ce grand nombre de coups par minute que peut donner la pompe, fait que le fluide chemine dans la colonne de refoulement avec une vitesse quasi uniforme, et ce, avec un minimum de volant et une seule manivelle.

Pour arriver à pouvoir faire marcher la pompe dans ces conditions, c'est-à-dire à une vitesse normale capable de régulariser, dans une large mesure, les différences de pression et de vitesse dues aux différentes positions de la manivelle, et par cela éviter les coups de bélier résultant de la descente de la colonne verticale du refoulement, il était nécessaire de parer aux inconvénients qui limitent la vitesse des pompes telles qu'on les construit ordinairement.

Lorsque le piston moteur d'une pompe marche à une trop grande vitesse, le fluide animé, d'une vitesse proportionnelle, entraîne les soupapes d'aspiration et de refoulement, et leur communique une force vive dans le sens du mouvement qui fait qu'elles ne reprennent que lentement, à chaque pulsation, leur position normale.

Ces effets de force vive sont naturellement proportionnels au carré de la vitesse du fluide, et ne permettent par conséquent d'augmenter celle-ci que dans d'étroites limites.

Aux chocs que produisent les soupapes entraînées de bas en haut, viennent souvent s'ajouter ceux de la colonne de refoulement qui, pour les causes indiquées, précédemment, peut reprendre son mouvement de haut en bas et appliquer ces soupapes avec violence sur leur siège

L'effet de ces chocs est d'autant plus désastreux que la hauteur de refoulement est plus considérable.

Les moyens employés dans le but de remédier à ces inconvénients sont nombreux ; mais, quelque ingénieux qu'ils soient, ils n'ont permis d'augmenter que dans une faible mesure la vitesse moyenne du piston des pompes.

Les modifications apportées aux pompes ordinaires par l'appareil rationnel dont nous donnons la description permettent de donner au piston une vitesse quasi illimitée. Elles consistent à réduire graduellement la vitesse normale du fluide aux passages des soupapes tant d'aspiration que de refoulement et à rétablir ensuite graduellement cette vitesse normale au-delà de ces passages. Les soupapes se meuvent par cela, pour ainsi dire dans un milieu stagnant. Ces résultats sont obtenus par l'emploi de tuyères convergentes et divergentes.

DESCRIPTION DE LA POMPE A ÉPANOUISSEMENT

Toute la disposition sera facilement comprise par le croquis schématique ci-dessous (fig. 1 et 2).

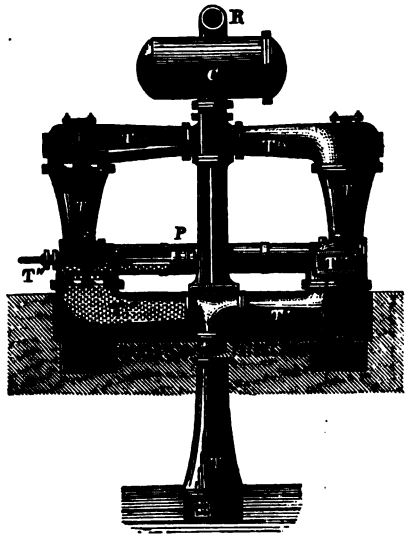


FIG. 1

FIG. 2

Aspiration. — L'eau, à l'état de repos dans la crépine d'aspiration, ne prend la vitesse normale que graduellement au moyen d'une tuyère parabolique convergente T placée au-dessus de la boîte renflée de la soupape de fond [1].

L'eau, arrivée à la partie supérieure du tuyau d'aspiration, avec la vitesse normale du piston de la pompe, vitesse qu'elle a acquise au sortir de la tuyère T, diminue graduellement de vitesse jusqu'à ce qu'elle ait atteint la soupape d'aspiration grâce à la tuyère divergente parabolique T'.

1. En effet, si l'on suppose que la section de la grande base de la tuyère T est égale à N fois la section S du piston P marchant à une vitesse V l'on pourra poser pour le travail de la pression atmosphérique p à l'aspiration :

$$p\,SV = p\,N\frac{S\,V}{N}$$

La vitesse de l'eau à son point de départ au puisard, ne devra donc être que $\frac{V}{N}$ nonobstant la vitesse V du piston. Par le même raisonnement l'on concevra le ralentissement et l'accélération de vitesse au-dessus et au-dessous des vitesses d'aspiration et de refoulement.

L'adjonction de semblables tuyères d'aspiration aux pompes centrifuges, aux pulsomètres, aux injecteurs, aux élévateurs, facilite singulièrement l'amorçage et la bonne marche de ces appareils.

Refoulement. — Cette soupape d'aspiration étant franchie avec une vitesse d'autant plus réduite que ses passages sont d'une section plus grande que la section du tuyau d'aspiration, il est essentiel que le fluide reprenne sa vitesse normale, insensiblement afin qu'il puisse suivre le piston P dans sa marche quelque rapide qu'elle soit. Ce résultat est obtenu au moyen de la tuyère parabolique convergente T''.

L'eau poussée par le piston est refoulée dans la tuyère divergente T''' et arrive pour les mêmes raisons à franchir, avec une vitesse réduite, la soupape de refoulement qui n'est plus que faiblement entraînée, à l'encontre de ce qui a lieu dans les pompes ordinaires.

Une fois les soupapes de refoulement franchies sans perturbation, il est essentiel que l'eau reprenne graduellement la vitesse qu'elle doit prendre dans la conduite de refoulement R. Ce résultat est encore obtenu au moyen d'une tuyère convergente T^{IV}.

Dans la disposition des figures de la page précédente, les soupapes, par surcroît de précaution, ont été munies de ressorts, comme dans les pompes ordinaires, ce qui est inutile si l'évasement de la tuyère a été convenablement calculé à l'effet de dépouiller assez complètement le fluide de sa force vive.

Sur le tuyau de refoulement, est également intercalé un réservoir d'air qui, quoique moins nécessaire que dans une pompe ordinaire, peut encore, dans le cas d'un ralentissement dans la marche de la pompe, avoir son utilité pour la la régularisation de la vitesse du fluide.

Une petite tuyère divergente faisant office de compresseur d'air placée entre les tuyères T'' et T''' permet d'alimenter d'air comprimé ce réservoir. Cet appareil très important n'est pas figuré sur le dessin.

L'on conçoit très bien que, grâce à l'épanouissement rationnel de la veine fluides au-dessus et au-dessous des soupapes, les chocs résultant de l'ascension ou de la descente de la colonne soient complètement évités et d'autant plus, que ces soupapes, vu leur grande section de passage, ont une levée très réduite. Il est évident aussi qu'au lieu d'une soupape unique, *l'évasement permet l'emploi de soupapes multiples* de petit diamètre.

Afin d'obtenir, dans les diverses tuyères convergentes et divergentes une vitesse uniformément retardée ou uniformément accélérée, on a donné à ces tuyères un profil rigoureusement parabolique.

Ce profil est indispensable à l'obtention d'un marche régulière, comme le prouve la démonstration ci-après :

Supposons que A M soit la génératrice supérieure du cylindre de la pompe, et B K l'élargissement maximum de la tuyère T''' conduisant à la soupape de refoulement. (Fig. *a*, p. 285).

Supposons encore qu'une molécule d'eau qui a été poussée en A par le piston P de la pompe, monte en ligne droite vers B, siège de la soupape de refoulement,

avec une vitesse uniforme v ; au bout d'un temps t, elle aurait parcouru l'espace AB égal à vt.

Il est évident, d'après les lois du mouvement des fluides, que l'évasement du tuyau aura pour effet de diminuer la vitesse du fluide.

Considérons donc cet évasement ou l'augmentation progressive du diamètre du tuyau, comme une force constante qui sollicite la molécule en A, supposée à l'état de repos, vers le point M, pour retarder uniformément son mouvement, si elle en avait un, dans le sens opposé à AM. Le retard opposé au mouvement par cette force que nous appellerons R, en un temps t serait représenté par

$$AM = \frac{1}{2}\frac{R}{m} t^2,$$

m étant la masse de la molécule.

Les deux causes agisant ensemble, la molécule serait au point K dans le temps t et à chaque point de la course la valeur de y et de x serait

$$y = v\,t \qquad \text{et} \qquad x = \frac{1}{2}\frac{R\,t^2}{m}$$

Pour avoir l'équation de la courbe, remplaçant t par sa valeur et éliminons nous aurons

$$y^2 = \frac{2\,m\,v^2}{R}\,x$$

équation d'une parabole rapportée à une tangente et au diamètre passant par le point de contact.

Le tracé de l'évasement indispensable à la marche régulière de l'appareil est donc celui indiqué dans la figure a.

Les résultats réellement extraordinaires fournis par l'appareil dont nous venons de donner la description, ont une grande importance au point de vue de la machine d'exhaure souterraine dont l'emploi tend à se généraliser.

Non seulement la pompe à épanouissement, pour une exhaure donnée, présentera une économie au point de vue du prix d'achat, mais l'exiguité de l'emplacement qu'elle exige la fera préférer à cause du bénéfice qu'elle permet de réaliser sur la construction et l'entretien de la salle souterraine.

COURBES DE CHANGEMENT DE DIRECTION

Outre les avantages résultant de la marche tranquille des soupapes, la disposition présente encore l'avantage de diminuer considérablement le travail à fournir pour vaincre les frottements aux changements de direction. En effet, ces frottements produisent une perte de charge Y dont l'expression est

$$Y = B\,\frac{V^2}{2\,g}$$

dans laquelle V est la vitesse et B un coefficient qui dépend de l'angle de déviation.

Il est évident que la faible vitesse de l'eau aux changements de direction où sont placées nos soupapes, réduira la résistance à son minimum et permettra une plus grande vitesse.

Afin d'obtenir les mêmes résultats aux divers points de la conduite où la direction du fluide doit changer, nous avons construits nos courbes d'après les mêmes principes. (Voir fig. 10 du mémoire précédent, page 289.)

Le tracé en pointillé, marque la section normale du tuyau ; l'agrandissement de section a lieu suivant le rayon extérieur et est constitué par deux profils paraboliques partant des collets *a* et *b* et se raccordant à la bissectrice de l'angle *a*.

L'on comprend aisément qu'une section double *z z'* fasse diminuer la vitesse du fluide de moitié et que la porte de charge y soit 4 fois moins considérable. Cette disposition des coudes est indiispensable si l'on veut marcher à très grande vitesse.

DISPOSITIFS DIVERS DE LA POMPE

Pompes à piston ordinaire.

Pour les pompes d'alimentation et pour les pompes de mine devant refouler l'eau jusque 160 mètres, nous employons soit le piston à cuir embouti, soit le piston métallique ordinaire.

Pour actionner *les pompes de mine à action directe*, nous donnons pour les refoulements ci-dessus la préférence au moteur Tangye indiqué par la figure 3. Dans ce moteur, la course s'effectuant toujours intégralement, la consommation de vapeur, quoique plus grande que dans les moteurs à manivelle ordinaires y est beaucoup moindre que dans les *moteurs à tiroir plat dont la distribution est manœuvrée par des jeux de fer extérieurs.*

Avec ces derniers moteurs, dont la vogue est si grande aujourd'hui, et les systèmes si variés, la consommation de vapeur par les espaces nuisibles est très importante. Ils ne peuvent du reste permettre qu'une vitesse normale très faible (0^m,50 environ par 1").

Le moteur que nous préconisons est relié à la pompe par une entretoise en fonte H.

Sa distribution est manœuvrée par la vapeur elle-même sans aucun choc. Dans le dessin figure 3, le piston est sensé marcher de gauche à droite ; aussi le côté droit du cylindre est en communication avec la décharge.

Si le piston arrive au bout de sa course, il soulève la soupape à téton G, le conduit M est alors ouvert et il met le côté C du plongeur D du tiroir en com-

munication avec l'atmosphère. La pression intérieure du plongeur D pousse alors

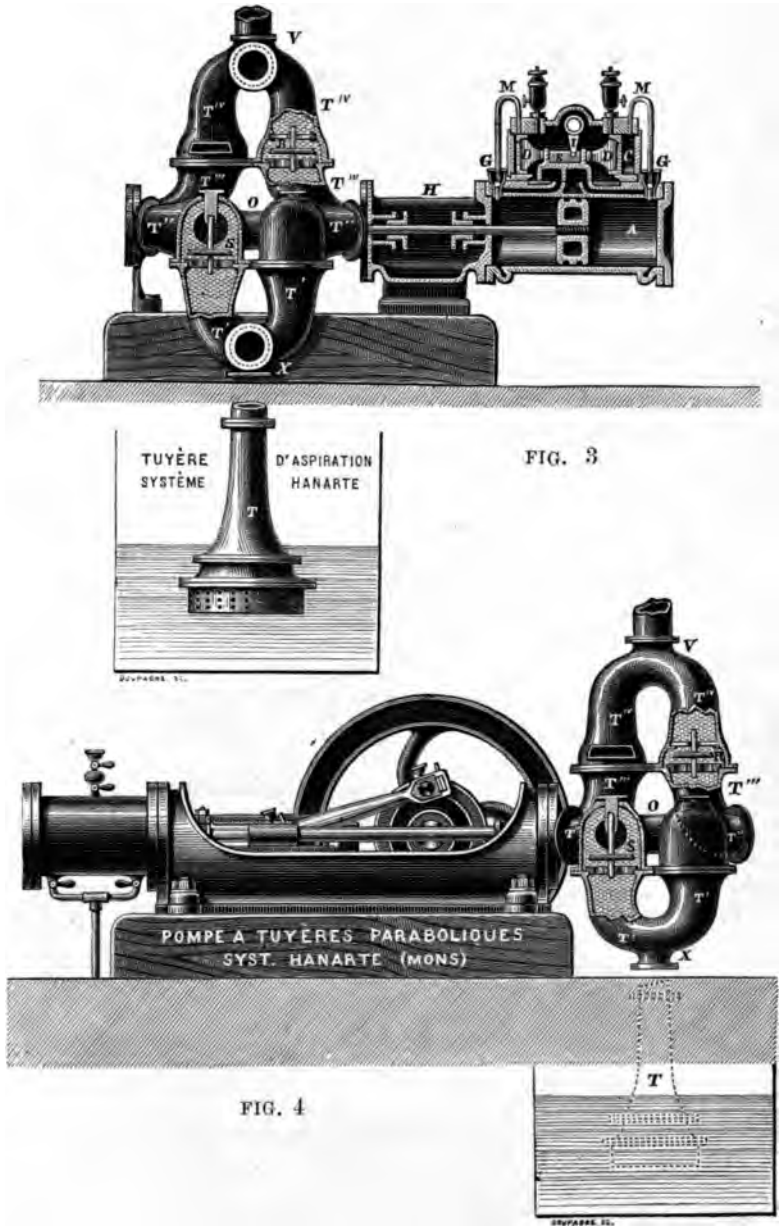


FIG. 3

FIG. 4

celui-ci vers la droite. Cette pression communique alors vers la partie droite du cylindre, tandis que la partie gauche communique avec la décharge. La marche vers la gauche continue alors et ainsi de suite.

Ces pompes peuvent être jumelées et refouler sur la même conduite.

Pour les pompes alimentaires et autres, placées à la surface nous préférons les *pompe à traction directe avec moteur à tiroir plat* manœuvré par un excentrique, comme le montre la figure 4. Cette disposition a pour avantage de procurer une grande économie et une grande régularité dans la marche, nonobstant un très faible volant.

Pompes à piston plongeur.

Pour les refoulements plus considérables, nous employons les pistons plongeurs qui présentent l'avantage de permettre de s'assurer à chaque instant de la garniture et sans la refaire, de pouvoir l'améliorer, par un simple serrage des boulons du presse-étoupe même pendant la marche.

Les pistons plongeurs sont, pour la plupart du temps, construits d'une façon irrationnelle.

Nous avons rencontré beaucoup d'installations tant horizontales que verticales présentant la disposition fig. 5.

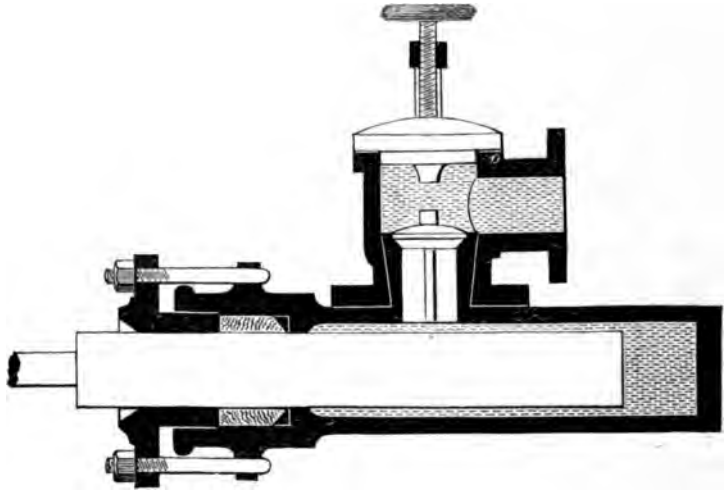


FIG. 5

Il est évident que, dans une telle disposition, l'eau, pour arriver aux soupapes étant obligée de voyager en sens inverse du mouvement du plongeur, dans un espace annulaire très rétréci, éprouve une résistance considérable.

Il n'est pas étonnant que pour corriger une construction aussi défectueuse, l'on ai pensé à renfler le corps de pompe comme dans les dispositifs fig. 6, et fig. 7.

A ces dispositifs établis, croyons-nous, surtout au point de vue d'une forme

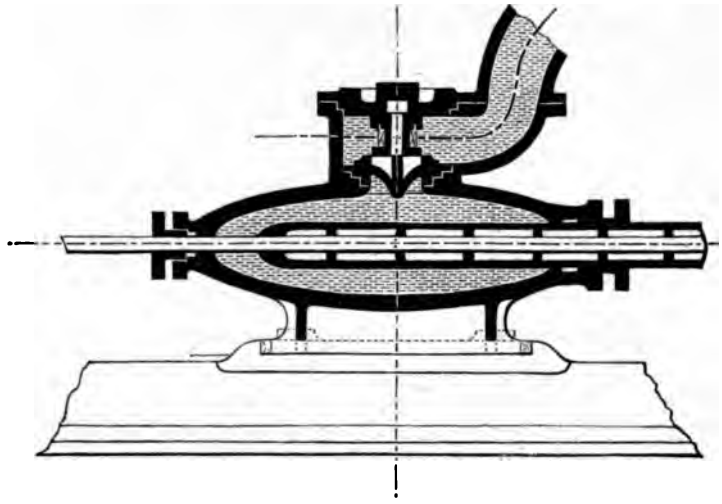


FIG. 6

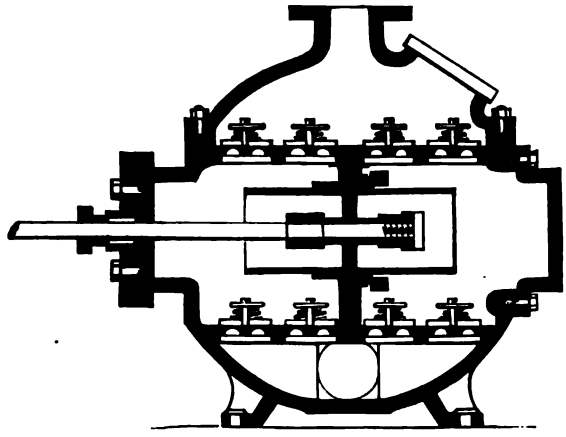


FIG. 7

plus compacte, nous préférons la disposition plus logique imaginée par Girard (fig. 8), dans laquelle le *piston plongeur pousse toujours l'eau devant lui.*

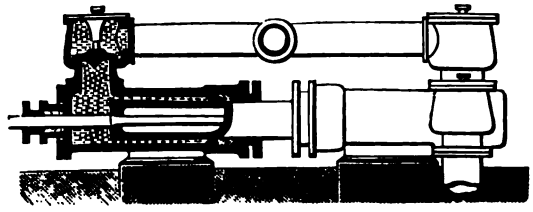


FIG. 8

Ainsi sont évités les *retours* et les *remous* qui se produisent inévitablement dans les systèmes précédents.

Pompe parabolique à piston plongeur horizontal.

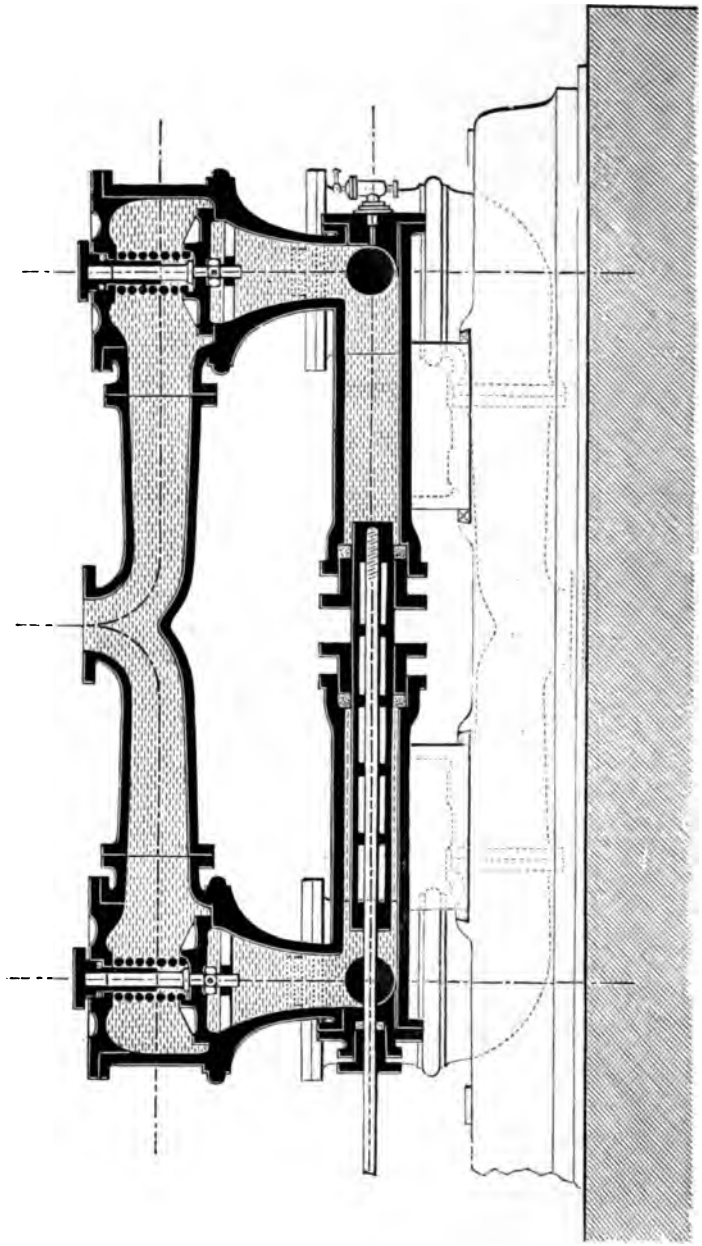


FIG. 9

Pompe parabolique à piston plongeur vertical.

C'est à une disposition semblable à celle de la figure 8 et que nous avons appliqué le perfectionnement précédemment décrit.

Son application faite à des pompes à plongeur horizontal et vertical, comme il est indiqué aux figures 9 et 10, constitue, selon nous, la disposition rigoureusement rationnelle. Elle donne, du reste, dans la pratique, les meilleurs résultats pourvu que l'on établisse convenablement les conduites d'aspiration et de refoulement.

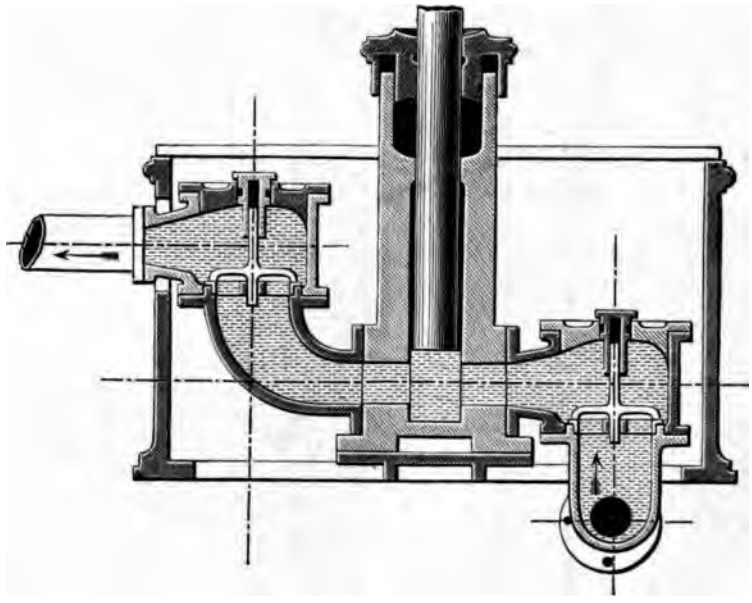


FIG. 10

MM. les ingénieurs désireux de se rendre compte de la marche des pompes à épanouissement pourront visiter les grandes installations hydrauliques des aciéries Boël à La Louvière (Belgique) consistant en 3 pompes du système, actionnées par 3 coudes à 120°. Ces pompes font le service de l'alimentation et des laminoirs. Elles peuvent fournir chacune à leur vitesse maximum 100 mètres cubes à l'heure, comme aussi les installations des laminoirs de Jemmapes, d'Hautmont, des usines Solvay, etc., etc.

Condenseur avec pompe à épanouissement parabolique.

Dans l'établissement des pompes souterraines, il est souvent indispensable, tant au point de vue de l'économie de vapeur qu'à celui de la suppression des

tuyaux de décharge qui sont souvent encombrants et coûteux, de placer à la suite de la pompe un condenseur à pompe à air.

Pour les mêmes raisons que celles qui nous ont guidé dans la construction de nos pompes, nous avons modifié ces appareils condenseurs (fig. 9 du mémoire précédent, p. 288). Nous les constituons par deux colonnes C C à évasement parabolique.

Le piston P complètement noyé fait descendre et monter l'eau dans les colonnes et produit ainsi d'abord l'aspiration de la vapeur, venant des machines par la conduite V. Cette vapeur, condensée déjà en partie par l'injection d'eau du conduit circulaire O O percé de trous placé dans la capacité I, est aspirée avec l'eau par les soupapes S S et suit la nappe descendante.

Ensuite, dans la course inverse, les produits de la condensation et les gaz sont expulsés par la nappe montante qui s'épanouit, à travers le clapet R dans l'atmosphère, par la décharge D.

Par suite de l'épanouissement des nappes d'eau dans les colonnes C C, les remous et les résistances qui se produisent dans les o ndenseurs ordinaires lorsque la vitesse est un peu grande, sont complètement évités. L'appareil présentant aussi un maximum de parois dispersantes produit une condensation plus parfaite avec une moindre quantité d'eau.

NOTE

SUR LE

TRANSPORT DE L'ÉNERGIE PAR L'AIR COMPRIMÉ

PAR

M. SOLIGNAC

De tous les systèmes de transport de l'énergie, l'air comprimé est certainement celui qui répond le mieux aux désidérata d'une distribution de force qui peuvent se résumer comme il suit :

1° Possibilité de diviser à l'infini et en proportions quelconques la force à distribuer.

2° Obtenir ce résultat avec le minimum de dépenses de premier établissement sur la conduite.

3° Satisfaire au plus grand nombre d'applications possibles avec le minimum de consommation.

4° Avoir enfin le meilleur rendement possible.

5° Etre inoffensif pour le consommateur aussi bien que pour le producteur.

Or, l'air comprimé remplit toutes ces conditions, les unes complètement, les autres d'une façon approchée, mais il répond à tous les besoins, c'est là le secret de son rapide développement à Paris, où M. Popp, en fondant la Compagnie Parisienne de l'air comprimé, a le premier, fait voir tous les avantages qu'on pourrait tirer de cet agent.

Je dis que mieux que tout autre, il peut se diviser à l'infini. L'exploitation parisienne en est un exemple puisqu'elle possède actuellement 500 applications, de tous genres, depuis les moteurs de 100 chevaux, jusqu'aux moteurs de 6 kilogrammètres. Une liste des applications de cette Compagnie, jointe à la présente note, établit ce fait d'une façon indiscutable. Vous y verrez que les petites forces au-dessous d'un cheval y sont en majorité. De plus, l'indépendance de chaque moteur est absolue ; l'arrêt brusque voulu ou accidentel d'une machine sur le réseau n'influence en rien la conduite générale, ne produisant ni coup de

bélier comme avec l'eau, ni échauffement du moteur comme avec l'électricité ; tout se résume à un ralentissement de vitesse dans la conduite qui ne présente aucun inconvénient.

La deuxième condition relative à l'économie de la conduite donne un avantage incontestable à l'air comprimé à haute pression. En effet, les pertes de charge sont insignifiantes et peuvent être même négligées dans la pratique pour la plupart des cas comme l'indique le tableau ci-dessous établi à la suite des travaux de percement du Saint-Gothard.

Vitesse de l'air à l'origine des conduites. en mètres par seconde	Pertes de pression en millimètres de mercure observées dans des conduites de 1000 mètres de longueur et d'un diamètre de					
	0m.100	0m,150	0m,200	0m,250	0m.300	0m,350
1	6	4	3	3	2	2
2	26	18	13	11	9	8
3	62	42	31	25	21	18
4	108	72	54	44	36	31
5	167	112	84	67	56	48
6	233	156	117	94	78	67

Dans le réseau de la Compagnie Parisienne qui compte 55 000 mètres de développement pour la force motrice, la perte de charge entre Saint-Fargeau et le point extrême de la conduite est à peine d'un demi-kilogramme; l'ensemble principal du réseau forme une boucle partant de Saint-Fargeau par le faubourg du Temple et les grands boulevards passant par la rue Royale et revenant à son point de départ par la rue de Rivoli et la Bastille.

Cette conduite principale a 30 centimètres de diamètre sur tout son parcours. On lui a conservé le même diamètre en raison de cette forme en boucle et des nombreuses ramifications secondaires qui réunissent les deux branches, de sorte que l'ensemble des conduites forme un seul et unique réservoir où on peut considérer, en pratique, la pression comme sensiblement constante en tous les points.

Les conduites employées à Paris sont de 5 types principaux : $0^m,040$, $0^m,060$, $0^m,080$, $0^m,100$, $0^m,200$ et $0^m,300$ et leur prix de revient s'établit suivant le tableau ci-contre :

$0^m,040$	à	6 fr.	50	le mètre		en fer
$0^m,060$	à	8	»	»		en fer
$0^m,080$	à	9	20	»		en fer
$0^m,100$	à	12	50	»		en fer
$0^m,200$	à	24	»	»		
$0^m,300$	à	33	»	»	en égout	en fonte
$0^m,300$	à	30	»	»	en terre	en fonte

Si nous donnons à l'air comme nous le faisons à Paris, une vitesse de 4 à 6 mètres par seconde, nous verrons que comparativement à l'eau où l'on peut atteindre à peine 2 mètres, en consentant d'énormes pertes de charge, la canalisation par l'air comprimé sera 3 fois plus économique que la canalisation par eau, laissant de côté la question de rendement dont nous parlerons tout à l'heure. Il est vrai que dans les distributions hydrauliques faites jusqu'à ce jour, on a employé des pressions plus considérables que celle de 6 kilogrammes adoptée par la Compagnie Parisienne de l'air comprimé à Paris, mais aujourd'hui que cette question de l'air comprimé est mieux connue et qu'on a vu qu'il n'y avait rien à craindre sous le rapport de la conduite, on n'hésiterait pas à employer les mêmes pressions surtout lorsqu'on songe que l'on n'aurait pas à redouter les coups de bélier si fréquents dans les conduites d'eau, l'air en raison de sa compressibilité servant de matelas entre les parois de la conduite et le choc qu'elle pourrait avoir à supporter.

Si au contraire, on compare son prix de revient à celui d'une canalisation électrique, son avantage est encore plus éclatant comme l'indique le tableau annexé au présent mémoire.

Ce tableau établit le prix de revient comparatif d'une usine installée à Billancourt et amenant 70 000 chevaux à la place de la Concorde sans desservir aucun riverain sur son parcours. On y voit que l'usine productrice par l'électricité reviendrait à 31 200 000 francs et que l'usine productrice et réceptrice de l'air comprimé reviendrait à 37 000 000 de francs. Mais les conduites d'air ne coûteraient que 2 800 000 francs, tandis que les conduites électriques reviendraient à 18 000 000 de francs ; de sorte qu'il en résulte que pour avoir la même énergie disponible à l'extrémité d'une conduite électrique ou à la sortie d'une usine réceptrice d'air comprimé, l'énergie étant toujours disponible sous forme électrique, il faudrait dépenser par l'air comprimé 40 000 000 de francs environ et par l'électricité 50 000 000 soit en faveur de ce dernier mode de transport une différence de 20 %.

On se rend compte d'où provient l'écart si l'on considère que le prix de revient de la conduite électrique est de 667 francs le mètre $\times$ 4, soit 2 668 francs et que le prix du mètre de conduite pneumatique est de $50 \times 8 = 400$ francs, ce qui fait une différence au mètre de 2 268 francs. Or l'augmentation de dépense

qu'entraîne l'installation des compresseurs à l'usine centrale d'air comprimé et des aéro-moteurs à l'usine réceptrice est amortie de fr. 2 268 par mètre parcouru, il suffira donc de diviser l'augmentation, dont nous parlions, dans le cas précédent, et qui est ici de 6 000 000 de francs, par 2 268 pour voir à quelle distance l'électricité perd ses avantages au profit de l'air comprimé, et nous trouvons qu'à 2 600 mètres, l'équilibre est établi et que les 4 400 mètres restant à parcourir constitueront le bénéfice au profit de l'air comprimé soit 4 400 $\times$ 2 268 donnant 9 979 200 francs ou en chiffre rond les 10 000 000 portés au tableau.

Nous ferons remarquer que dans ce tableau nous avons prévu les réchauffeurs nécessaires pour donner à l'air comprimé un rendement supérieur à celui que l'on obtiendrait par son emploi pur et simple, et que nous avons établi notre prix de revient de canalisation électrique par deux conducteurs présentant une section de 20 000 millimètres carrés laissant passer 18 000 ampères et que, par mètre courant, nous avons déjà 1 100 francs de cuivre ne laissant que 234 francs pour la pose, l'isolant et les enveloppes de protection. Ces deux comparaisons de la canalisation de l'air comprimé avec les modes de transmission qui peuvent lui être opposés prouvent surabondamment que le système répond à la deuxième condition que nous nous sommes posée au début de cette note.

Sur le troisième point, l'air comprimé est de tous les agents celui qui donne la plus complète satisfaction; car si nous prenons la classification adoptée dans dans le rapport de M. Boudenoot en la modifiant, nous verrons que l'air comprimé est un agent de force, de lumière et de chaleur, tout aussi bien que le gaz, car le gaz ne donne de la lumière que par suite d'une action chimique, parce qu'il se trouve en présence d'un comburant. Il en est de même pour la chaleur ; ce comburant est l'air, et suivant la proportion du mélange, la lumière ou la chaleur augmente ou diminue. Un bec de gaz ne brûlerait pas sans air, pas plus qu'un chalumeau ne donnerait de la chaleur sans soufflerie. Il en est de même pour la force. Le gaz par lui-même n'est donc pas l'unique source de ces trois manifestations de l'énergie. Il n'y joue pas un rôle plus important que l'air et même on peut le remplacer et obtenir des résultats supérieurs avec des huiles de pétrole ou des schistes brûlés par un courant d'air comprimé comme il en existe de nombreux exemples en Allemagne et comme du reste nous vous en ferons voir des spécimens lors de notre visite à Saint-Fargeau. Il en est de même pour les sources de chaleur ; nous avons établi en effet des fourneaux domestiques d'après le même principe. Pour compléter cette démonstration, nous vous soumettrons un four crématoire où les plus hautes températures sont obtenues par le mélange d'air comprimé et de gaz d'éclairage. Dans ces diverses applications, l'air joue un rôle tout aussi important que le combustible et par conséquent il pourrait figurer dans le tableau de M. Boudenoot au même titre que le gaz.

Quant à l'électricité elle se transforme, il est vrai en lumière, en chaleur ou en

force, mais les applications calorifiques sont fort coûteuses par ce procédé et ne sont pas encore sorties des expériences du laboratoire. L'air comprimé au contraire, peut suppléer directement ou indirectement à tous ces agents de distribution de l'énergie, et en passant rapidement en revue ces applications décrites d'une façon plus détaillée dans les notices ci-jointes, nous verrons que lorsqu'il sert à la combustion des huiles minérales ou végétales, il produit la chaleur ou la lumière, que lorsqu'il est employé en chalumeaux ou en souffleries, comme il y en a plusieurs exemples dans le réseau parisien, il peut produire les plus hautes températures, qu'il peut remplacer également une canalisation d'eau sous pression en communiquant à de l'eau non montée sa propre pression. C'est cette application que nous désignons dans les notes ci-jointes sous le titre *Élévation des eaux à tous les étages* et le cas est intéressant à Paris, où l'eau industrielle, c'est-à-dire bon marché, n'atteint pas une haute pression. Du reste à moins de conditions topographiques spéciales, il en sera toujours de même, car les eaux naturelles que l'on peut distribuer à bas prix ne peuvent être grévés d'une dépense d'élévation qui n'aurait intérêt que dans quelques cas spéciaux. C'est alors qu'une canalisation d'air comprimé à haute pression vient en aide à une canalisation d'eau à basse pression.

Enfin l'air comprimé est un agent de force comme le gaz, l'électricité, la vapeur, l'eau, les transmissions mécaniques, mais il satisfait à ce dernier besoin avec beaucoup plus de souplesse et d'une façon beaucoup plus appropriée aux différentes applications que les agents que nous venons de citer, et cela avec un rendement que nous examinerons tout à l'heure et qui peut lutter avantageusement dans toute comparaison.

Les applications de force sont de natures différentes :

1° Les applications directes sans transformation de mouvement où l'air agit sur la force à vaincre à la manière d'un ressort, comme dans les monte-charges, les grues, les appareils de levage. Dans ce cas, les moteurs à gaz seraient d'un emploi difficile, car ils demandent une mise en marche qui ne peut être instantanée ; les moteurs électriques sans présenter le même inconvénient au même degré ne fonctionnent à leur maximum de rendement que lorsqu'ils ont atteint leur vitesse normale.

Auparavant lorsque par leur rotation, ils n'ont pas créé une force contre-électro-motrice au courant qui les alimente, ils se comportent comme des résistances passives, absorbant le courant en pure perte. Avec l'eau, on rencontre un inconvénient encore plus grave, c'est l'absence de détente qui oblige à employer toujours le même volume d'eau sous la même pression quel que soit l'effort à vaincre. Enfin si l'on compare l'air comprimé aux deux agents qui s'en rapprochent le plus, la vapeur ou l'air raréfié, ou est amené à rejeter le premier mode de distribution en raison des inconvénients des pertes de calories sur sa canalisation, et le second, en raison de sa puissance limitée qui n'atteint jamais même

théoriquement une atmosphère. L'air comprimé au contraire, grâce à la détente, peut exercer sur une surface donnée une pression rigoureusement proportionnelle à l'effet demandé et n'a de limite que sa pression maximum que l'on peut rendre suffisante pour tous les besoins de l'industrie.

La seconde forme de travail de force motrice est l'alimentation des moteurs de tous systèmes, et nous sommes obligés à ce sujet de nous occuper du rendement qui fait l'objet du quatrième désidératum que nous nous sommes proposé au début. Pour se rendre compte exactement des phénomènes qui se passent dans une machine à air comprimé, il faut la considérer comme une véritable machine thermique où la différence de température entre l'air à son introduction et à son échappement exprime le nombre de calories transformées en kilogrammètres. Et si, jusqu'à présent, les résultats obtenus avec les machines à air n'ont pas donné tout ce qu'on devait en attendre, c'est que les industries qui les ont employées, travaux publics ou mines, se sont beaucoup plus préoccupées de la rapidité ou de la simplicité des installations que du maximum de rendement. Lorsqu'on a employé le chauffage préalable, on avait en vue surtout de relever dans l'échelle barométrique la chute de température qui se produit dans l'aéro-moteur et par exemple de l'obtenir entre 100° au-dessus de 0, au lieu de l'avoir entre plus 20 et moins 60.

C'est à cela que tendaient les réchauffeurs de Mekarsky où l'air passait dans un calorifère à air surchauffé ; mais ces moyens n'ont jamais procuré complète satisfaction, car étant donnée la faible capacité calorifique de l'air, il aurait fallu établir des surfaces de chauffe considérables qui auraient entraîné à des complications et à des dépenses incompatibles avec les genres d'industries qui employaient l'air comprimé.

Mais lorsque ce mode de distribution a été appliqué à une grande ville et qu'on a eu surtout en vue un maximum de rendement à obtenir, on a dû se poser la question sous une autre forme et chercher à emmagasiner dans la machine à air le plus grand nombre de calories avec le minimum de surface de chauffe ; c'est ce que la Compagnie Parisienne a obtenu en étudiant le surchauffage de l'air au moyen de l'injection directe de la vapeur. L'abaissement de température de l'air pendant sa détente devient alors un avantage, car dans ce cas, il faut obtenir un échange rapide des calories positives contenues à l'état latent dans la vapeur d'eau et des calories négatives prises à l'air par la transformation de la chaleur en travail. Or pour un échange de température, il y a tout avantage à ce qu'il se fasse entre les valeurs les plus différentes possible. On peut aussi arriver à condenser dans cet air détendu et à très basse température, la totalité de la vapeur injectée qui abandonne au profit de l'air ses 537 calories de chaleur latente de vaporisation relevant la ligne du diagramme de détente, qui dans un aéro-moteur sans injection de vapeur décroîtrait progressivement. Il se produit alors dans la machine à air un phénomène analogue à l'explosion du moteur à gaz,

mais d'une façon beaucoup moins brusque, l'échange de température ne se faisant que lentement.

A l'échappement de la machine, on ne recueille donc que de l'air à une température dont on est maître et qui peut être celle de la température d'admission et de l'eau à une température supérieure en raison de sa plus grande capacité calorifique.

Si cette eau retourne au vaporisateur, il n'y aura de calories perdues que celles qui auront traversé les parois du cylindre, on réalisera ainsi dans une machine mixte à vapeur et à air, la machine thermique théorique où toutes les calories seront transformées en travail. On voit donc que l'air comprimé au lieu d'être un agent inférieur pour la transmission de la force est au contraire la condition indispensable de tout moteur économique.

Ces considérations ne s'appliquent pas évidemment à deux applications de force tout à fait spéciales :

1° Au tout petit moteur destiné à actionner les outils légers comme les machines à coudre, les appareils chirurgicaux, les machines à graver, ou la toute petite industrie, applications nombreuses sur le réseau de la Compagnie Parisienne. En effet, en raison de la petitesse des moteurs et de leur faible consommation, il est inutile d'employer la détente, et dans ces conditions l'air comprimé ne donne pas lieu à des phénomènes de réfrigération nuisibles pour la marche, et il a l'avantage d'employer les appareils de très petite dimension légers et peu encombrants. Pour ces applications, le rendement atteint environ 30 % et ce quantum est à peu près celui trouvé pour les petits moteurs électriques.

2° Cette chute de température, loin d'être un inconvénient, est un avantage précieux dans les industries où il est utile d'obtenir du froid, et dans bien des cas, cette propriété de produire des calories négatives doit être appréciée autant que la possibilité de produire des calories positives ; et si l'on considère les installations frigorifiques, on voit que la force motrice devient un produit secondaire, le froid étant la marchandise principale, c'est ce qui se présente dans de nombreuses installations de la Compagnie Parisienne de l'air comprimé, où le moteur charge pendant la journée des accumulateurs destinés à l'éclairage du soir et entretient en même temps des glacières, fort appréciées par les restaurateurs ou les limonadiers ; mais c'est surtout dans une des stations centrales que la Compagnie Parisienne a établi à la *Bourse du Commerce* pour desservir le secteur de M. Victor Popp, que cette application ressort avec tous ses avantages.

On a installé dans les sous-sols de ce bâtiment de vastes magasins protégés sur toutes leurs faces par une couche de briques de liège et on a divisé ce vaste local en une série de chambres à cloisons métalliques, autour desquelles on fait circuler l'air d'échappement des aéro-moteurs, dont le travail est employé à la charge d'accumulateurs concourant à l'éclairage de cette portion du secteur. La

force motrice ici devient le sous-produit et quel que soit son prix de revient, elle constitue encore un bénéfice, puisque l'exploitation de la chambre froide est une opération commerciale lucrative par elle-même. Il ne faut pas considérer le rendement comme uniquement dépendant du moteur récepteur, mais il faut tenir compte aussi de la production économique de l'air comprimé et pour cela, il faut faire une compression isothermique. ce que les compresseurs en installation aujourd'hui à l'usine de la Compagnie Parisienne réalisent complètement. En effet l'air comprimé y atteint à peine 25°. Un spécimen de machines se trouve actuellement à l'Exposition de la maison Cockerill, au Palais des machines.

Mais ne voulant pas abuser, Messieurs, plus longtemps de votre temps, je vous prierai de vous reporter pour toutes les questions de rendement, tel que permet de l'établir l'exploitation de la Compagnie Parisienne, au rapport de M. Riedler et à celui plus récent de M. Kennédy dont je joins deux exemplaires à la présente notice. Je terminerai en vous faisant remarquer que la cinquième condition posée au début de cette note est absolument remplie par la distribution d'air comprimé, car aucun système ne présente la même inocuité, aussi bien pour le producteur que pour le consommateur et je remets à la visite que vous avez bien voulu promettre de nous faire à Saint Fargeau, l'examen des détails du système de canalisation par l'air comprimé que M. Popp a installé à Paris et qui par un développement successif qui a commencé par une simple distribution horaire, nécessite aujourd'hui l'entretien d'une usine de 5000 chevaux, c'est-à-dire de la plus forte installation mécanique de Paris et qui, à ce titre, intéressera je l'espère, les membres du Congrès.

TABLEAU COMPARATIF

des prix de revient des usines génératrices avec transmission par l'air comprimé et par l'électricité.

Usine du côté de Billancourt pour l'air comprimé :

Distance à parcourir en conduite sans service pour les riverains 7 000
Force motrice : 70 000 chevaux, avec les pertes de rendement.
Quartiers desservis : Opéra et Sébastopol.

Achat d'un terrain à 20 fr. le mq. 50 000 mq. . .		1 000 000
Construction de l'usine à 40 fr. le mq.		2 000 000
75 machines à vapeur de 1 000 chevaux à 50 000 fr.		3 750 000
150 chaudières de 500 chevaux à 50 000 fr.		7 500 000
Massif des machines à 2 000 fr. la machine . . .		150 000
Maçonnerie des chaudières à 2 000 fr. la chaudière .		300 000
Cheminées des chaudières à 15 000 fr.		75 000
Compresseurs d'air avec les accessoires, réservoirs, etc. 25 000 fr. par 1 000 chevaux		875 000
Installations mécaniques diverses, courroies, transmissions		100 000
Tuyauterie		200 000
Imprévu		550 000
Usine productrice	Total.	17 500 000
Achat des usines réceptrices à 40 fr. le m. 50 000 mètres	2 000 000	
75 aéro-moteurs à 50 000 fr.	3 750 000	
150 réchauffeurs à 10 000 fr.	1 500 000	
360 machines électriques à 15 000 fr. donnant 1 000 ampères 100 volts . . .	5 400 000	
Massif des machines à air 2 000 fr. par machine et 250 fr. par mach. électrique	240 000	
Transformateurs et onduleurs à 15 000 fr. par machine de 1 000 ampères . . .	5 400 000	
Installations mécaniques, courroies transmissions, etc.	250 000	
Tuyauterie.	100 000	
Conducteurs électriques	500 000	
Imprévu	360 000	19 500 000
Canalisations 8 tuyaux de 0m,40, pose en égout à 50 fr. le mètre, environ 7 000 mètres.		2 800 000
Soit environ *40 000 000* de francs		39 800 000

Usine du côté de Billancourt pour l'électricité :

Distance à parcourir en conduite sans service pour les riverains 7 000
Force motrice : 70 000 chevaux, avec les pertes de rendement,
Quartiers desservis : Opéra et Sébastopol.

Achat d'un terrain à 20 fr. le mq. 60 000 mètres . .	1 200 000
Construction de l'usine à 40 fr. le mq.	2 400 000
75 machines à vapeur de 1 000 chevaux à 50 000 fr. .	3 750 000
150 chaudières de 500 chevaux à 50 000 fr. . . .	7 500 000
Massif des machines à 2 000 fr. la machine . . .	150 000
Maçonnerie des chaudières à 2 000 fr. la chaudière. .	300 000
Cheminées 5 à 15 000 fr.	75 000
450 machines électriques à 15 000 fr. (on est obligé de porter les machines à ce nombre en raison de la perte sur la ligne)	6 750 000
450 transformateurs et onduleurs à 15 000 fr. . .	6 750 000
Installations mécaniques, courroies, transmissions, etc.	350 000
Tuyauterie	200 000
Imprévu	775 000
Usine productrice Total . . .	31 200 000
Canalisation	
18 000 ampères sous 2 000 volts par conduites de 600 ampères, afin d'éviter les pertes de charge sur une ligne directe à raison de 667 fr. le mètre d'après notre série tableau n° 2	18 000 000
Soit environ *50 000 000* de francs.	49 000 000

Différence en faveur de la canalisation par air comprimé 10 000 000 de francs, soit 20 %.

Observations : Puisque l'installation air comprimé revient à 40 000 000, canalisation comprise et que l'usine électrique revient déjà à 31 000 000 francs, il y a donc avantage à employer l'air comprimé comme agent de transmission aussitôt que la canalisation atteint $\frac{37\,000\,000 - 31\,200\,000}{\text{[illegible]}} = 2\,600$ mètres environ.

SIXIÈME QUESTION

MACHINES THERMIQUES

autres que les machines à vapeur d'eau

RAPPORT DE M. J. HIRSCH

INGÉNIEUR EN CHEF DES PONTS ET CHAUSSÉES

EXPOSÉ ET DIVISION.

L'étude des moteurs thermiques est une des plus importantes et peut-être la plus difficile de celles qui sont soumises aux délibérations du Congrès. Le Comité d'organisation m'a fait l'honneur de me proposer de traiter cette question; il aurait pu trouver, sans chercher beaucoup, soit en dehors de lui, soit parmi ses membres, des ingénieurs infiniment plus compétents et mieux préparés sur la matière. Toutefois, je n'ai pas cru qu'il me fût possible de décliner cette tâche, si ardue qu'elle puisse être.

D'ailleurs, il n'est pas question ici d'une étude complète et détaillée; dans l'esprit du Comité, il s'agit simplement d'établir une sorte de programme préparatoire, un canevas simple et sommaire, sur lequel pourront se développer librement les discusions au cours des séances du Congrès.

Je me contenterai donc de résumer rapidement l'état actuel de la question des moteurs thermiques, et d'indiquer quelques-uns des points qui restent encore obscurs, et sur lesquels des recherches nouvelles sont à désirer. Enfin, je chercherai à établir un court programme des sujets qui semblent pouvoir être utilement discutés.

COMPARAISON AVEC LA MACHINE A VAPEUR.

Lorsqu'on étudie les effets dynamiques obtenus par l'action de la chaleur, il semble impossible de ne pas parler, ne fût-ce qu'à titre de comparaison, des

moteurs thermiques qui sont, jusqu'à ce jour, les machines industrielles par excellence, des moteurs qui empruntent leur puissance à la chaleur par l'intermédiaire de la vapeur d'eau. Cette comparaison, entre les machines à vapeur ordinaires et les autres machines thermiques, est venue naturellement à l'esprit de tous ceux qui se sont occupés de la transformation de la chaleur en travail : elle a été présentée sous bien des points de vue différents.

En se plaçant au point de vue purement abstrait, on a pris, comme base de comparaison, le *rendement théorique maximum*. On arrive ainsi à un résultat remarquable : étant donnés divers moteurs, utilisant comme intermédiaires différents fluides, la vapeur d'eau, une vapeur quelconque, un gaz ou même un corps quelconque, entre les mêmes limites de température, le rendement théorique maximum est le même, quel que soit le corps intermédiaire.

Dans cet énoncé, on entend par *rendement théorique maximum* la fraction de la chaleur dépensée qui disparaît sous forme de travail. Ce rendement est obtenu si l'on suppose que toute perte de travail et toute chute de température sans effet utile aient pu être évitées.

Ce théorème se déduit directement des principes fondamentaux de la thermodynamique et présente le même degré de certitude que ces principes, lesquels sont généralement admis comme incontestables. Toutefois si, en lui-même, il prête peu à la critique, il en est tout autrement des conséquences que l'on a cherché parfois à en déduire.

On a dit, par exemple : du moment que le rendement est le même, quel que soit le fluide intermédiaire, il importe peu que ce fluide soit une vapeur ou un gaz quelconque ; or, la vapeur d'eau est, pratiquement, le fluide le plus commode à manier ; donc c'est celui qui permettra de se rapprocher le plus des conditions théoriques ; en conséquence, la machine à vapeur d'eau présente une telle supériorité qu'il est inutile de poursuivre l'étude des autres machines thermiques.

Cette conclusion décourageante ne saurait être acceptée sans réserve ; nous n'insisterons pas pour le moment sur le vague et le défaut de précision d'un pareil raisonnement, longtemps accepté comme péremptoire ; il semble plus utile de montrer comment ce verdict exclusif, prononcé en faveur de la machine à vapeur, a été cassé par les faits ; nous prendrons nos exemples dans la pratique la plus courante.

Comparons, au point de vue du rendement thermique, une machine à vapeur ordinaire avec une machine à gaz ordinaire.

Une excellente machine à vapeur de l'industrie consomme, par heure et par cheval effectif, une quantité de houille qui ne descend guère au-dessous d'un kilogramme ; or, 1 kilogramme de bonne houille à vapeur représente une puissance calorique de 8500 calories.

Une machine à gaz ordinaire consomme, par heure et par cheval effectif, en

viron 1 mètre cube de gaz, dont la combustion développe en moyenne 5300 calories.

Ainsi, pour produire une même quantité de travail (1 cheval-heure), la machine à gaz consomme $\frac{1}{3}$ de chaleur en moins que la machine à vapeur; le rendement thermique de la première est de plus de 50 % supérieur à celui de la seconde.

Il ne sera pas hors de propos d'insister sur les chiffres qui ont servi de base à cette comparaison. Une consommation d'un kilogramme de houille par heure et par cheval effectif implique une machine à vapeur à condensation, puissante, très parfaite, très soigneusement conduite et entretenue. Il est d'ailleurs à remarquer que la machine à vapeur a aujourd'hui une existence industrielle deux fois séculaire; que les ingénieurs les plus éminents, les chercheurs les plus intrépides n'ont cessé de s'attacher à l'améliorer; qu'elle est arrivée à un degré de perfection qui ne laisse plus beaucoup de place à des progrès ultérieurs.

La machine à gaz, au contraire, est née d'hier; ses applications industrielles sont toutes modernes et infiniment moins étendues que celles de la machine à vapeur; la théorie des moteurs à gaz est à peine ébauchée; et, de fait, l'indicateur de Watt, appliqué sur ces moteurs, montre avec toute évidence que leur fonctionnement est encore extrêmement éloigné des conditions théoriques assurant un rendement élevé. Et néanmoins, avec ces moteurs. le chiffre d'un mètre cube de gaz par cheval-heure est réalisé couramment, même pour des puissances fort modérées.

Ainsi donc, au point de vue exclusif du rendement thermique, la machine à gaz, si imparfaite qu'elle soit encore, l'emporte haut la main sur les machines à vapeur les plus perfectionnées. C'est là un fait d'un grand intérêt, qu'il était important de rappeler dès le début de cette étude.

Cette question du rendement est sans doute loin d'être la seule à examiner; d'autres considérations doivent intervenir, qui sont parfois d'une importance plus grande encore. Néanmoins, pour ne pas interrompre cet exposé, nous allons l'étudier plus en détail, et rechercher comment il peut se faire que le rendement d'un moteur thermique quelconque, d'une machine à gaz par exemple, puisse être beaucoup plus élevé que celui des meilleures machines à vapeur.

DÉCOMPTE DE LA CHALEUR CONSOMMÉE PAR UNE MACHINE A VAPEUR.

A cet effet, nous analyserons le fonctionnement d'une machine à vapeur, considérée comme machine thermique, et nous étudierons comment se répartit la chaleur qui lui est communiquée.

Prenons, comme plus haut, une très bonne machine à vapeur à condensation, consommant par heure et par cheval effectif 1 kilogramme de bonne houille pour vapeur.

Un cheval-vapeur, travaillant pendant une heure, représente une quantité de travail de

$$75 \times 60 \times 60 = \ldots\ldots \quad 270\,000 \text{ kgm.}$$

1 kilogramme de houille correspond, comme pouvoir calorifique, à 8500 calories.

Si toute cette chaleur était transformée en puissance mécanique utilisable, à raison de 425 kilogrammètres par calorie, le travail correspondant serait de

$$8500 \times 425 = \ldots\ldots \quad 3\,612\,500 \text{ kgm.}$$

Le rendement calorique de la machine à vapeur considérée n'est donc que de

$$\frac{270\,000}{3\,612\,500}, \text{ soit } 7\,1/2\ \% \text{ environ.}$$

Ainsi, sur 100 calories confiées à une pareille machine, elle n'en rend, sous forme de travail, que $7\frac{1}{2}$; le reste, soit 92 calories $\frac{1}{2}$, sont perdues sous diverses formes.

Il ne sera pas sans intérêt d'examiner la façon dont s'opèrent ces énormes déperditions, d'établir le bilan de cette machine si perfectionnée, et cependant si prodigue.

Un moteur à vapeur se compose d'une chaudière, qui produit la vapeur, d'un récepteur, constitué lui-même par le cylindre et le piston, et d'une transmission allant du piston à la poulie ou à la roue de commande. Chacun de ces éléments intermédiaires est le siège d'une perte de travail à l'état calorifique ou à l'état dynamique; ce sont ces pertes que nous allons analyser :

1° Sur 100 calories, virtuellement contenues dans le combustible consommé, une partie seulement pénètre dans la chaudière pour y faire de la vapeur, le reste se disperse sous forme de fumées chaudes, de matières mal brûlées, par radiation, par conductibilité, etc.; le rendement industriel des bonnes chaudières ne dépasse guère 60 %; la quantité de chaleur parvenant à la machine sera donc au plus de $0{,}60 \times 100 = 60$ calories.

2° Le récepteur reçoit la vapeur de la chaudière à une certaine température; elle transforme en travail une partie de cette chaleur; le reste s'en va au condenseur. Supposons d'abord notre machine absolument parfaite; elle n'utilisera néanmoins qu'une fraction de la chaleur qui lui est communiquée, et la théorie démontre que cette fraction, appelée souvent le *coefficient économique*, dépend exclusivement des températures de la chaudière et du condenseur; plus l'écart entre ces températures est faible, plus le coefficient économique est petit.

Dans le cas pris comme exemple, on peut compter le coefficient économique pour 0,27 (1).

Sur les 60 calories délivrées à la machine, la fraction qu'un récepteur parfait transformerait en travail serait de

$$0{,}27 \times 60 = \ldots\ldots \qquad 16^{cal},2$$

3° Mais notre récepteur est loin d'être parfait : la détente et la compression sont incomplètes ; il y a des laminages de vapeur, des pertes de chaleur, des condensations, etc. ; de là, la nécessité d'introduire un nouveau coefficient, réduisant le travail du récepteur ; on peut évaluer ce coefficient à 0,60 ; le récepteur ne rendra que 0,60 du travail théorique, ce qui correspond à

$$0{,}60 \times 16{,}2 = \ldots\ldots \qquad 9^{cal},72$$

4° Enfin, il y a les frottements et les résistances passives, nécessitant l'introduction d'un nouveau coefficient, que l'on appelle souvent *coefficient de rendement organique*, et qu'on peut porter à 0,77 ; il nous reste, en définitive :

$$9{,}72 \times 0{,}77 = \ldots\ldots \qquad 7^{cal},50$$

que nous recueillerons sur l'arbre de couche sous forme de travail utilisable.

Pour ne constituer qu'une approximation évidemment grossière, les chiffres ci-dessus ont cependant une utilité, en ce qu'ils donnent une idée de l'ordre de grandeur des quantités qu'ils représentent. En les rapprochant les uns des autres, nous obtenons le tableau ci-après :

	Coefficients partiels	Calories restant	Calories perdues
Chaleur du combustible. . . .	1,00	100 cal.	0 cal.
1° Passage dans la chaudière . .	0,60	60	40,00
2° Coefficient économique . . .	0,27	16,2	43,80
3° Imperfection du cycle . . .	0,60	9,72	6,48
4° Rendement organique . . .	0,77	7,50	2,22
5° Rendement en travail . . .	0,075	7,50	92,50

Ici, comme plus haut, le travail utilisé ne représente que 7 $\frac{1}{2}$ % de la chaleur contenue dans le combustible.

La faible valeur de cette utilisation s'explique par deux raisons principales.

1. Le coefficient économique a pour valeur

$$\frac{t_1 - t_0}{273 + t_1}$$

t_1 température à la chaudière ; t_0, température au condenseur.
Au cas actuel, on peut admettre :
Une chaudière timbrée à 5kg, soit $t_1 = 158°$,
Un condenseur à la température $t_0 = 40°$,
Il vient ainsi, pour le coefficient économique

$$\frac{158 - 40}{273 + 158} = 0{,}27.$$

TRANSMISSION COMPLEXE

La première raison est le nombre de transformations que la chaleur doit subir avant de ressortir à l'état de travail : il faut qu'elle se dégage du combustible, qu'elle pénètre dans la chaudière pour former de la vapeur, que cette vapeur se rende au cylindre et agisse sur le piston ; le travail ainsi engendré est recueill sur l'arbre de couche à l'aide d'une transmission compliquée. Chacune de ces transformations comporte son rendement particulier. Ces nombreux coefficients, malgré la perfection relative de chacun des organes, sont tous nécessairement plus petits que l'unité ; leur produit, qui est le rendement final, est donc forcément assez faible. L'énergie se disperse et s'épuise en passant de l'un à l'autre des anneaux de cette chaîne longue et compliquée.

DU COEFFICIENT ÉCONOMIQUE

En second lieu, on remarquera en particulier la faible valeur de l'un de ces facteurs du rendement final : il s'agit du *coefficient économique*, évalué ci-dessus à 0,27. Ce coefficient est petit parce que les températures entre lesquelles évolue la machine à vapeur sont peu écartées l'une de l'autre. Entre la température de la chaudière (158° dans l'exemple ci-dessus) et celle du condenseur (40°), l'écart n'est que de 118°.

Serait-il possible d'augmenter cet écart ?

Du côté du condenseur, il y a peu de chose à gagner.

Du côté de la chaudière, l'emploi des hautes pressions permet de gagner quelques degrés ; mais on est vite arrêté dans cette direction, à cause de la rapidité avec laquelle s'élèvent les tensions de la vapeur d'eau saturée, dès qu'on dépasse un peu les températures usuelles. Au point de vue de la thermodynamique, l'usage de la triple et de la quadruple expansion, permettent l'emploi de pressions initiales plus élevées, correspond à une amélioration importante du coefficient économique. Toutefois, l'amélioration ainsi obtenue ne saurait être indéfinie ; l'application de températures un peu fortes à la vapeur saturée se heurte contre la loi physique des tensions de ce fluide, et il n'est pas à prévoir que cet obstacle puisse être de sitôt surmonté.

En réalité, la principale chute de température se produit entre le foyer et la chaudière ; elle se mesure par 1000° ou 1200°, et, au point de vue du coefficient économique, elle reste complètement inutilisée. Telle est la cause capitale du faible rendement thermique de nos machines à vapeur modernes.

Le tableau ci-dessus pourrait encore donner matière à de nombreuses et intéressantes observations, mais il est temps de quitter la machine à vapeur et d'entrer dans l'étude des autres moteurs thermiques.

DÉCOMPTE DE LA CHALEUR DANS LES MOTEURS THERMIQUES EN GÉNÉRAL

L'emploi d'un fluide autre que la vapeur d'eau permet-il d'échapper aux deux inconvénients graves signalés ci-dessus ?

Est-il possible, en se servant d'un autre intermédiaire, d'obtenir une transformation plus simple, plus directe et, par suite, plus économique de la chaleur en travail ?

Est-il possible de faire agir le fluide à des températures élevées, donnant un meilleur coefficient économique ?

A ces deux questions la pratique a répondu d'une manière nette et affirmative : les deux problèmes sont résolus dans le fonctionnement des machines à gaz.

Ainsi, en premier lieu, dans ces machines, le fluide moteur reçoit directement l'action de la chaleur ; il agit directement sur le piston ; la chaleur n'a plus à passer du foyer au métal, du métal à l'eau ; plus de chaudière, plus de tuyauterie compliquée ; la chaîne des transformations se trouve singulièrement raccourcie et simplifiée.

En second lieu, le fluide agit à la température même de combustion ; l'énorme chute de température existant entre le foyer et la chaudière se trouve dès lors supprimée. De ce fait résulte une élévation considérable du coefficient économique ; de 0,25 ou 0,30, il passe à 0,70 ou 0,80. C'est là, et là seulement, sans nul doute, que se trouve le secret du rendement thermique élevé de ces sortes de moteurs, car, sur d'autres points, ils sont encore bien inférieurs aux machines à vapeur les plus médiocres.

Les considérations qui précèdent peuvent se résumer en un mot : la vapeur d'eau saturée possède des propriétés physiques qui ne permettent pas, dans les moteurs tels qu'ils sont construits de nos jours, d'obtenir des rendements thermiques élevés ; rien ne semble s'opposer à ce que d'autres fluides, doués de propriétés physiques différentes, permettent de réaliser ces rendements élevés.

DU RENDEMENT THERMIQUE COMME BASE DE COMPARAISON

Cette question du rendement thermique, de l'économie dans l'emploi de la chaleur, a, par elle-même, une importance tellement grande qu'elle a plus d'une fois fait oublier les autres conditions auquelles un moteur industriel doit satisfaire, et qui n'est nullement permis de négliger. De là de nombreux mécomptes, de graves désaccords entre les indications d'une théorie incomplète et les résultats des applications pratiques.

Une première considération s'impose tout d'abord : quand on parle d'économie en matière industrielle, il ne s'agit pas d'économie de chaleur, mais d'économie d'argent. Or la dépense à faire pour dégager de la chaleur dépend, non seulement du nombre de calories obtenues, mais encore du prix de revient de chacune de ces calories. Ce prix de revient est lui-même la résultante d'un grand nombre d'éléments, parmi lesquels figure, en première ligne, le prix du combustible : une calorie de houille ne coûte pas le même prix qu'une calorie de gaz. Il faut aussi tenir compte des procédés mis en œuvre pour dégager la chaleur, des frais de main-d'œuvre, de l'entretien, des intérêts et de l'amortissement applicables aux appareils, aux bâtiments qui les abritent et au terrain qui les supporte, etc. Il est donc impossible d'affirmer *à priori* qu'un moteur à rendement thermique élevé soit nécessairement économique.

CONSIDÉRATIONS DIVERSES

L'économie pratique elle-même est loin d'être la seule question à considérer dans la production du travail ; il y en a d'autres, d'importance égale et souvent supérieure. Avant tout, un moteur thermique doit faire sa besogne, son *duty*, comme disent les Anglais. Si cette besogne est faite régulièrement, consciencieusement, pourrait-on dire, c'est le principal ; si par surcroît, elle est faite économiquement, c'est évidemment préférable ; mais, dans bien des cas, l'extrême économie dans la production du travail mécanique n'est qu'un avantage secondaire ; elle ne prend le premier rang que dans certaines applications tout à fait spéciales.

Les qualités que l'industrie exige d'un moteur dépendant, en premier lieu, de l'emploi auquel il est destiné ; tel moteur qui donnerait toute satisfaction dans une application déterminée serait, dans un autre cas, complètement inutilisable.

A ce point de vue, il convient, dans une étude d'ensemble, de s'en tenir à la discussion des propriétés d'un ordre assez général. C'est ce que nous allons essayer de faire.

La *régularité d'allure* est souvent une nécessité de premier ordre, particulièrement dans les applications à l'éclairage électrique ; comme régularité de marche, les bonnes machines à vapeur laissent peu à désirer ; on n'en saurait toujours dire autant des moteurs à gaz, qui ont, dans certains cas, donné lieu, de ce fait, à de sérieux mécomptes.

La question de l'*espace occupé* est souvent de grande importance ; la machine à vapeur, considérée en elle-même, est arrivée aujourd'hui à un degré de compacité qu'il semble difficile de surpasser ; mais la chaudière qui l'accompagne nécessairement est extrêmement encombrante ; de sorte qu'à ce point de vue les autres moteurs thermiques peuvent soutenir facilement la comparaison.

Des remarques analogues trouvent leur place en ce qui concerne la *légèreté*, qualité essentielle dans tous les cas où le moteur se déplace en même temps que

le point d'application de l'effort qu'il exerce ; il en est ainsi pour les machines de navigation, de chemins de fer, de tramways, et surtout pour l'aérostation ; la lourde chaudière devient alors un *impedimentum* fort gênant, qui s'aggrave encore lorsqu'il s'agit d'emporter un certain approvisionnement de charbon et d'eau. Néanmoins, jusqu'ici, surtout pour les grandes puissances, la machine à vapeur semble encore l'emporter, comme légèreté, sur les autres moteurs thermiques, grâce aux perfectionnements remarquables qui ont été apportés à ses divers organismes. Mais il est difficile d'affirmer que cette supériorité se maintiendra longtemps.

Certaines machines thermiques n'exigent pas d'eau pour leur fonctionnement; c'est là une qualité qui peut être précieuse dans bien des circonstances, notamment en vue des usages agricoles.

La machine à vapeur ne peut fonctionner qu'une fois la chaudière en pression ; la montée en pression exige un temps plus ou moins long ; c'est, dans certaines applications, un inconvénient de premier ordre. La plupart des autres moteurs thermiques échappent à cette sujétion. Une machine à gaz, par exemple, se met en marche en un instant ; elle est toujours prête à fonctionner et ne consomme qu'autant qu'elle travaille.

Il est une question capitale, c'est celle de la *sécurité*. Une chaudière à vapeur est un réservoir de puissance dynamique, qui n'est pas sans offrir de sérieux dangers ; aussi les pouvoirs publics ont-ils dû intervenir et veiller à ce que l'établissement de ces magasins d'explosion compromît le moins possible la sécurité publique. De là des difficultés, même des impossibilités absolues pour beaucoup d'installations. Les autres moteurs thermiques ne présentent pas ces dangers, et leur emploi ne saurait, en aucune façon, inquiéter le voisinage. Des diverses causes qui, dans les dernières années, ont contribué à propager l'industrie des machines à gaz et à air chaud, la considération de la sécurité a peut-être été une des plus efficaces.

CLASSIFICATION DES MOTEURS THERMIQUES

Nous ne pousserons pas plus loin cette comparaison. Il est un fait certain, c'est que les moteurs thermiques prennent chaque jour une place plus importante dans l'industrie. Il convient d'examiner ces moteurs en eux-mêmes, au moins dans leurs lignes générales.

L'application de la chaleur à la production du travail ayant donné naissance à un grand nombre de systèmes variés, pour mettre un peu d'ordre dans notre étude, il est nécessaire de classer ces machines. Nous laisserons de côté, dans cette classification, les systèmes qui n'ont existé qu'à l'état de projets ou d'ébauches.

Les machines thermiques qui ont reçu de sérieuses applications peuvent se

diviser en deux grandes catégories, suivant que le fluide agissant est une vapeur ou un gaz permanent.

Sous la dénomination de *machines à vapeur*, on peut comprendre les machines dans lesquelles le fluide prend successivement l'état gazeux et l'état liquide.

Comme gaz permanents, on n'a guère utilisé jusqu'ici, dans les machines motrices, que l'air atmosphérique successivement réchauffé et refroidi. Nos machines à gaz permanent s'appelleront donc *machines à air chaud.*

Enfin, dans certains moteurs, on a essayé des combinaisons variées ; de là une troisième catégorie de machines, que nous désignerons sous le nom de *machines mixtes et diverses.*

En tenant compte des diverses variétés qui peuvent se présenter, on est conduit à établir comme il suit la classification des moteurs thermiques autres que les moteurs à vapeur d'eau saturée :

1° *Machines à vapeur.*

Vapeur d'eau surchauffée.
Vapeurs diverses.

2° *Machines à air chaud*, sans régénérateur de chaleur ou avec régénérateur de chaleur.

Chauffage par transmission.

Chauffage intérieur { par combustion simple, / par explosion { sans compression, / sans compression.

3° *Machines mixtes et diverses.*

Nous allons passer en revue les moteurs appartenant à ces diverses classes ; nous rappellerons au fur et à mesure les connaissances acquises, les résultats constatés et les obscurités à éclaircir.

MACHINES A VAPEUR D'EAU SURCHAUFFÉE

Quoique la question de la surchauffe de la vapeur d'eau rentre, à certains points de vue, dans l'étude des machines à vapeur ordinaires, il ne paraîtra pas néanmoins hors de propos d'en dire ici quelques mots. La vapeur d'eau surchauffée est, en effet, un fluide dont les propriétés diffèrent notablement de celles de la vapeur d'eau ordinaire.

A côté des propriétés précieuses qui l'ont fait adopter d'une manière générale dans les machines thermiques, la vapeur d'eau saturée présente un inconvénient sérieux : sa pression s'élève très vite avec sa température. De là, comme on l'a

vu, une conséquence grave : le rendement thermique des machines à vapeur d'eau saturée est nécessairement faible.

On peut théoriquement, et on l'a bien souvent essayé pratiquement, tourner cet inconvénient : il suffit pour cela, une fois la vapeur produite, d'y ajouter de la chaleur sans augmenter sa pression ; à cet effet, on fait passer la vapeur saturée dans un tuyau ou serpentin plongé, soit dans les fumées, soit dans les flammes du foyer : c'est un chauffage par transmission ; le fluide ainsi fabriqué est envoyé dans un récepteur à piston.

On peut, dans l'emploi de la vapeur d'eau surchauffée, distinguer deux cas : ou bien la surchauffe est modérée, ou bien elle est très élevée.

La vapeur d'eau très surchauffée n'a pas jusqu'ici réussi dans les machines : elle brûle les lubrifiants et fait gripper les surfaces flottantes ; elle présente, dès lors, une partie des inconvénients qui ont retardé pendant si longtemps l'essor des machines à air chaud ; le succès de la vapeur surchauffée semble donc dépendre, avant tout, de la découverte d'un lubrifiant qui ne se laisse pas attaquer par ce fluide.

Lorsqu'il s'agit d'une surchauffe modérée, la question est tout autre ; ainsi qu'il résulte des études de M. G.-A. Hirn, il se produit une condensation partielle à l'entrée dans le cylindre, de sorte que, sauf certains avantages accessoires au point de vue du rendement, on rentre ici dans le cas de la vapeur saturée. L'obstacle qui a empêché jusqu'ici de se répandre ce mode d'emploi de la vapeur d'eau, c'est la difficulté de régler le degré de surchauffe eu égard aux variations de vitesse du courant de vapeur dans le surchauffeur et aux variations de vitesse et de température des flammes ou des fumées ; il en résulte que la surchauffe est tantôt excessive, et alors la machine grippe, tantôt insuffisante, c'est-à-dire sans effet.

Les moyens essayés jusqu'ici pour parer à cet inconvénient se sont montrés impuissants. L'un des plus ingénieux consiste à fabriquer le fluide par un mélange dosé de vapeur saturée et de vapeur très surchauffée ; la proportion de vapeur surchauffée se règle, à l'aide d'appareils automatiques, d'après la température du mélange obtenu.

VAPEURS DIVERSES

Depuis les tentatives si remarquables, si persévérantes de du Tremblay, l'emploi des vapeurs autres que la vapeur d'eau ne semble plus avoir été essayé avec quelque suite. En dehors des difficultés inhérentes au problème posé par l'éminent ingénieur, l'échec peut être attribué, pour une large part, à des circonstances étrangères au système en lui-même ; les progrès si rapidement réalisés dans la construction des machines marines, la commande directe de l'hélice, la

condensation par surface, l'usage de hautes pressions, la double et triple expansion, ont permis d'atteindre des résultats que du Tremblay n'avait jamais pu obtenir, et ont frappé ses recherches de stérilité industrielle.

Du Tremblay avait essayé les vapeurs de corps très volatils : l'éther, le chloroforme. D'autres, après lui, ont suivi la même voie, et ont proposé l'ammoniaque, l'acide sulfureux, le sulfate de carbone, même l'acide carbonique.

Ces recherches n'ont pas jusqu'ici amené des résultats pratiques. Toutefois, il semble que le dernier mot soit loin d'être dit.

Ce qui limite les services que peut rendre la vapeur d'eau saturée, ce sont les relations qui existent entre sa pression et sa température ; aux températures élevées correspondent des pressions excessives; aux températures modérées des pressions insuffisantes. De là, un double inconvénient : le rendement thermique est faible, et les dimensions des appareils deviennent très considérables.

En disposant, à la suite de la machine à vapeur ordinaire, une machine actionnée par la vapeur d'un liquide très volatil, du Tremblay supprimait le second inconvénient; sa machine se rapprochait, par certains points, de la machine compound moderne ; mais elle était, théoriquement parlant, bien plus satisfaisante en ce qui concerne les dimensions du cylindre de détente.

D'autre part, il paraît peu probable que l'on puisse trouver réunies, dans un fluide unique, les propriétés physiques nécessaires pour qu'il puisse travailler, sous des pressions modérées, successivement à haute et à basse température. La combinaison de deux vapeurs est donc une solution qui présente quelque chance de succès et qui mérite d'être étudiée.

Il va de soi qu'à côté de la question des tensions, d'autres questions d'ordre pratique doivent intervenir. La solution de ces problèmes pratiques n'a été donnée qu'imparfaitement par du Tremblay ; c'est là une autre cause des échecs qu'il a éprouvés. Quoi qu'il en soit, il semble hors de doute qu'en vue de la production du travail, des études bien dirigées, relativement aux propriétés physiques des vapeurs, peuvent conduire à des résultats d'un véritable intérêt.

Tout récemment, on a proposé, pour de petites forces, de faire usage de vapeur de pétrole.

MACHINES A AIR CHAUD

Arrivons aux machines à air chaud.

Considéré au point de vue purement théorique du rendement thermique maximum, l'air ne diffère en rien de n'importe quel autre fluide. Entre deux mêmes températures, le cycle de rendement maximum, ou *cycle de Carnot*, conduit au même coefficient économique, quel que soit le fluide intermédiaire. Mais, lorsqu'on arrive à l'application, il en est tout autrement. La réalisation pratique

du cycle de Carnot, à l'aide d'un gaz permanent, exigerait des cylindres de dimensions absolument inadmissibles, ou bien des pressions exorbitantes, quand bien même on se contenterait d'une figuration grossière du cycle. A ce point de vue, l'air est absolument inférieur à la vapeur.

Les très fortes pressions n'ont pas été essayées dans les machines à air chaud à cause de la difficulté de tenir les joints. Quant aux grands cylindres, ils coûtent cher et entraînent des résistances passives énormes. En fait, les machines à air chaud en usage ont, toutes choses égales, des dimensions bien plus grandes que les machines à vapeur de même puissance, et cependant leur cycle s'éloigne beaucoup de celui de Carnot.

Nous venons de parler des joints : c'est là un des points qui dominent toute la question. S'il est déjà difficile de tenir un joint étanche contre de l'air froid à pression modérée, cette difficulté devient presque insurmontable lorsqu'il s'agit d'air chaud à haute pression ; on a essayé, jusqu'ici, de la tourner plutôt que de la résoudre, et les tentatives n'ont pas toujours été heureuses.

Réduire les dimensions et faire des joints étanches, voilà les deux problèmes qui se posent d'eux-mêmes, toutes les fois qu'on étudie un moteur thermique.

Que si, en outre, on cherche à obtenir un rendement élevé, c'est-à-dire à faire usage de hautes températures, alors la question des joints se complique d'une façon presque décourageante.

DES RÉGÉNÉRATEURS DE CHALEUR

Le cycle de Carnot procure le rendement thermique maximum; on a cru pendant longtemps qu'il était le seul qui jouit de cette propriété ; de là cette idée qu'une machine à air chaud, donnant un rendement acceptable, devait nécessairement avoir des dimensions démesurées.

Une étude plus attentive a montré qu'à côté du cycle de Carnot, d'autres modes de fonctionnement permettent de réaliser le rendement maximum, grâce à l'emploi de ces appareils ingénieux, que l'on a appelés *récupérateurs*, *régénérateurs de chaleur*, *tamis respiratoires*, etc.

Sur une machine à air munie de ces appareils, les diagrammes d'indicateur peuvent se rapprocher de ceux fournis par une machine à vapeur. Comme conséquence, les régénérateurs permettent, tout en conservant un rendement élevé, de diminuer dans une forte proportion les dimensions des cylindres.

Les régénérateurs, proposés par Stirling, au commencement de ce siècle, appliqués depuis lors par Ericsson, Franchot et d'autres encore, ont disparu à peu près complètement, malgré tous leurs avantages théoriques, et ne se retrouvent plus guère aujourd'hui que dans quelques machines de faible puissance. La raison de cet insuccès semble être d'ordre tout à fait pratique. On n'a pas su, jus-

qu'à présent, construire un régénérateur satisfaisant à toutes les conditions exigées : un appareil de cette nature devrait être fait d'une matière qui résistât, sans altération aux températures élevées et aux courants violents de gaz ; il devrait offrir au fluide qui le parcourt de très grandes surfaces de contact, en même temps que de larges sections de passage, et cependant n'occuper qu'un volume très restreint, de manière à ne pas augmenter démesurément les espaces nuisibles. La réussite d'une pareille construction ferait sans doute faire un grand pas à la question des machines à air chaud.

CHAUFFAGE EXTÉRIEUR

Dans un grand nombre de systèmes de machines à air, le fluide, enfermé dans un récipient métallique, est chauffé au moyen d'un foyer extérieur, par transmission à travers les parois du récipient.

Ce mode de chauffage est fort commode, la pureté du gaz n'est pas notablement altérée ; le chauffage se fait sans difficulté, et le combustible peut être de qualité ordinaire et à bas prix.

Mais, au point de vue de l'emploi de la chaleur, le système est moins satisfaisant ; la paroi métallique transmet assez mal la chaleur à l'air, beaucoup plus mal que dans les chaudières à vapeur, où la tranmission se fait de la tôle au liquide, sans chute notable de température. De plus, la surface de chauffe est presque nécessairement insuffisante. Aussi l'utilisation de la chaleur du combustible est-elle fort médiocre.

D'autre part, le métal ne peut communiquer à l'air avec lequel il est en contact des quantités un peu importantes de chaleur qu'à la condition d'être beaucoup plus chaud que lui ; mais, aux températures élevées, il perd sa résistance et s'altère rapidement. Pour ménager les enveloppes, il faut donc modérer le chauffage, et, par suite, renoncer à donner à l'air les hautes températures qui seules permettraient d'obtenir un rendement thermique satisfaisant.

Ces sortes de machines ne semblent donc convenir que pour le cas de petites forces, lorsque la question d'économie n'est qu'accessoire et que la question de commodité est prédominante.

CHAUFFAGE INTÉRIEUR

Pour obtenir des rendements élevés, il convient que la combustion se fasse directement à l'intérieur de la machine ; dans ce cas, l'air devient à la fois moteur et comburant ; la température maximum qu'il atteint n'est autre que la température de combustion.

Cette combinaison offre en théorie des avantages importants; mais elle présente, à l'application, des difficultés sérieuses.

COMBUSTIBLES SOLIDES

S'il s'agit de combustibles solides, ces difficultés sont extrêmement graves et nombreuses. En premier lieu, l'allumage et la mise en train sont loin d'être commodes; le feu une fois allumé, il faut l'entretenir par l'introduction méthodique de fragments de combustible dans une capacité close; la machine doit marcher d'une manière continue, sans quoi, après chaque arrêt un peu prolongé, le feu s'est éteint, et l'on doit recommencer les opérations longues et pénibles de la mise en train; les fumées chaudes et chargées de suie attaquent et empâtent les organes; l'élimination des cendres et scories n'est pas facile à obtenir. Enfin, dans certains systèmes de machines à air chaud, les espaces nuisibles jouent un rôle capital; or, les enveloppes réfractaires dont on entoure le foyer sont poreuses et volumineuses; elles offrent donc des vides considérables, qui peuvent troubler le fonctionnement de la manière la plus grave.

Belou avait imaginé une machine à air chaud avec combustion intérieure entretenue par un combustible solide. Malgré son ingéniosité et celle de ses collaborateurs, ses recherches, longues, coûteuses, persévérantes, ont échoué devant ces obstacles.

Le problème a été repris récemment, et, grâce à des combinaisons habiles, on a pu tourner en partie ces difficultés, et faire fonctionner pratiquement des moteurs de ce genre. Le combustible est du coke, et les frottements intérieurs sont constamment nettoyés et rafraîchis par un courant d'air froid.

COMBUSTIBLES GAZEUX

Lorsque l'on fait usage de combustibles gazeux, une partie de ces difficultés disparaissent. Ainsi l'admission du combustible est facile à régler; la production de fumée peut être fort atténuée et même disparaître; il n'y a pas à s'occuper des cendres ni des scories.

Mais les combustibles gazeux sont très peu répandus à l'état naturel. Pour faire usage d'un pareil combustible, on en est réduit à le préparer de toutes pièces, et par suite il coûte cher.

Le combustible gazeux le plus usité pour la production de la force motrice est le gaz de l'éclairage. Mais, en général, le prix en est fort élevé, incomparablement plus élevé, pour un même pouvoir calorique, que celui de la houille; il devient donc indispensable d'en économiser la consommation. C'est ce qui fait que, jusqu'ici, les machines, empruntant leur action au gaz de l'éclairage

ne s'emploient guère que pour les petites forces et dans le cas d'un travail intermittent et de peu de durée. La même nécessité a amené, dans les machines à gaz, des perfections considérables ayant pour résultat de diminuer leur consommation ; c'est ainsi, comme on l'a vu, qu'au point de vue de l'utilisation mécanique de la chaleur du combustible, les machines à gaz soutiennent victorieusement la comparaison avec les machines à vapeur les plus perfectionnées.

Le prix du gaz de l'éclairage ordinaire, dans les grandes villes, comporte, comme éléments principaux, les frais d'amortissement et d'entretien d'une immense canalisation, les dépenses correspondant aux fuites qu'elle occasionne, des frais généraux énormes, etc. Toutes ces dépenses accessoires l'emportent de beaucoup sur les frais de fabrication proprement dits. On a cherché, dans certains cas, à s'en affranchir, en fabriquant directement le gaz dans une petite usine spécialement consacrée à l'alimentation du moteur thermique et qui joue, à l'égard de ce moteur, le même rôle que la chaudière vis-à-vis de la machine à vapeur. La fabrication peut avoir lieu soit par distillation simple, soit par combustion incomplète.

Distiller de la houille pour en tirer du gaz, est une opération qui, économiquement parlant, est à peu près impraticable sur une petite échelle, à cause de la difficulté de vendre le coke et les sous-produits.

La combustion partielle se pratique dans des *gazogènes;* elle fournit un mélange, à proportions variables, de gaz inertes, d'oxyde de carbone et d'autres gaz combustibles ; cette transformation du combustible solide est assez simple et peu coûteuse. Malheurement les gazogènes actuels présentent des inconvénients qui ont singulièrement limité leur application à la production de la puissance motrice. Un gazogène demande une mise en train assez longue; son allure doit être régulière, et sa production s'accommode mal d'écarts un peu prononcés, qui amèneraient infailliblement des variations considérables dans la composition du gaz fabriqué. Une machine à gaz, accolée à un gazogène, perd ainsi une partie de ses avantages les plus précieux : on ne peut plus la mettre en marche instantanément et à volonté; de plus, les variations dans la composition du gaz réagissent de la manière la plus fâcheuse sur l'allumage. Ces inconvénients sont à peine atténués par l'interposition de gazomètres, dont l'installation est d'ailleurs toujours coûteuse.

COMBUSTIBLES LIQUIDES

Dans un grand nombre d'applications, il y aurait un intérêt de premier ordre à pouvoir se servir des combustibles liquides pour la production de la force motrice ; comme encombrement, comme poids, comme facilités d'emmagasinage, ils

offrent des avantages considérables. Comme commodité d'emploi, ils semblent comparables au gaz de l'éclairage sauf sur un point : l'allumage et la tenue de la flamme ; mais ce point est d'une importance capitale.

Pour arriver à produire ou à entretenir la combustion des liquides à l'intérieur de récipients sous pression, divers procédés ont été proposés ; ceux qui semblent avoir donné les meilleurs résultats pratiques sont les suivants :

On chauffe le liquide pour le vaporiser, et cette vapeur est injectée dans le récipient où elle doit brûler. L'allumage ainsi obtenu est facile et régulier ; mais la petite chaudière qui produit sous pression la vapeur inflammable n'est pas sans présenter de sérieux dangers.

Un second procédé, emprunté à d'autres industries, consiste à faire passer sur un liquide combustible et volatil un courant d'air suffisamment lent ; cet air se charge de vapeurs combustibles, et fonctionne dans un moteur analogue aux machines à gaz. Ce moyen est beaucoup moins dangereux que le précédent, mais la composition du gaz combustible ainsi fabriqué est influencée par diverses circonstances dont on n'est pas maître : constitution du liquide, température, vitesse du courant d'air, etc., de sorte que l'allumage ne se fait pas toujours bien régulièrement.

Enfin un troisième procédé consiste à injecter le liquide sous forme de poussière, en le pulvérisant par un jet d'air ; ce procédé n'exige pas, comme les précédents, l'emploi de liquides volatils et par conséquent fort dangereux à manier ; mais l'allumage du jet pulvérulent est irrégulier et capricieux ; de plus, il est difficile d'éviter l'encrassement des organes.

Les machines à liquides combustibles ont tenté bien des inventeurs et suscité bien des recherches ; malgré tout l'intérêt qui s'attache à la question, malgré les efforts qui ont été faits pour la résoudre, ces machines ne se répandent que très lentement dans l'industrie. Espérons que les difficultés que présente leur établissement, notamment la difficulté de l'allumage, finiront par être surmontées.

COMBUSTION OU EXPLOSION

Les machines à combustion intérieure se divisent en deux grandes classes suivant que la combustion se fait d'une manière régulière et continue ou qu'elle est explosive et intermittente.

Nous entendons ici par *combustion régulière* celle qui se produit lorsque le fluide combustible se consume progressivement et est fourni par débit régulier au fur et à mesure qu'il est brûlé.

Dans l'*explosion* au contraire, le fluide combustible est préalablement mélangé d'une manière intime avec l'air ; ce mélange, étant mis en présence d'un corps en ignition, s'enflamme brusquement, et l'inflammation se propage, en un temps très court, dans toute la masse du mélange.

Ces définitions sont loin d'être scientifiques : malgré des travaux considérables et justement estimés, les phénomènes relatifs à la propagation de la flamme et de l'explosion sont encore mal connus. Il paraît probable que, dans les cylindres des machines à gaz, l'explosion affecte une allure tout autre que dans l'eudiomètre ou les récipients des chimistes ; les diagrammes d'indicateur semblent le prouver, quoique, peut-être, il puisse subsister quelque doute sur l'exactitude des diagrammes obtenus, lorsque les variations de pression sont très rapides. Des recherches nouvelles et précises donnant l'analyse de ces phénomènes obscurs seraient fort à désirer.

Les machines à combustible solide ne comportent que la combustion continue ; les machines à combustible gazeux ou liquide comportent les deux modes de combustion.

COMBUSTION CONTINUE

Dans les machines à combustion continue, les pressions n'éprouvent que des variations progressives et régulières ; ces machines ont la même douceur de marche que les machines à vapeur. L'air, avant d'être introduit sur le foyer, doit subir une compression préalable.

On peut diviser ces machines en deux classes, suivant que la combustion se fait dans le cylindre ou dans un récipient spécial.

Dans le cas où la combustion a lieu dans un récipient spécial, les gaz de la combustion sont introduits dans le cylindre moteur à l'aide d'une distribution ; les organes de distribution, traversés par un courant de gaz à haute température, plus ou moins chargé de cendres, de suie et d'escarbilles, sont exposés à gripper et à se détériorer ; c'est là un des inconvénients graves qui ont fait échouer les tentatives faites pour appliquer ce système, notamment les essais si méritoires de Belou.

Dans les machines où la combustion se produit à l'intérieur du cylindre, cet inconvénient peut être évité ; on peut également par certains artifices, échapper à la difficulté de tenir contre l'air chaud le joint entre piston et cylindre, à la condition toutefois, de n'opérer qu'à température modérée, c'est-à-dire de sacrifier les rendements élevés. D'autre part, le foyer intérieur devant être entouré de matériaux réfractaires, les espaces nuisibles prennent beaucoup de volume ; il en résulte la nécessité de donner au cylindre une capacité considérable, et la machine devient fort encombrante.

EXPLOSION

En l'état actuel, les machines à explosion alimentées par un combustible liquide ou par du gaz de générateur ne diffèrent pas, en tant que mode de fonc-

tionnement, des machines à gaz d'éclairage. Ce sont ces dernières que nous aurons principalement en vue dans la suite de cet exposé.

Au moment de l'explosion, la pression des gaz augmente brusquement ; il y a un véritable choc, qui n'est pas sans être préjudiciable aux organes mécaniques.

C'est là un des inconvénients des machines à explosion ; c'est une des raisons qui font que jusqu'ici, on a hésité à aborder les grandes puissances à l'aide de ces machines.

Comme prix de revient de la force motrice, les machines à gaz ne peuvent soutenir la comparaison avec les machines à vapeur, à cause de la valeur très élevée du combustible consommé. L'usage de ces machines est donc aujourd'hui restreint aux cas où l'économie dans la production du travail peut être sacrifiée à d'autres considérations, considérations de sécurité, de faible encombrement, de prompte mise en marche, etc. Elles s'adaptent bien aux cas où le travail à produire est intermittent et de peu de durée.

Dans la plupart des applications néanmoins, le prix de revient de la force motrice a une importance qui ne peut pas être négligée, et c'est avec raison qu'on s'est attaché à augmenter l'effet utile du combustible coûteux brûlé dans les machines à gaz. Cette question mérite d'être examinée de plus près.

Nous n'essaierons pas d'établir, pour les moteurs dont il s'agit, un décompte numérique de l'emploi de la chaleur ; nous nous contenterons d'analyser les déperditions d'une manière sommaire et générale.

Dans une machine à gaz, le coefficient économique, tel que nous l'avons défini plus haut, est fort élevé ; si la machine était théoriquement parfaite, elle rendrait, par mètre cube consommé, quelque chose comme 6 à 7 chevaux-heures. En pratique, on est loin de ce compte, puisque chaque cheval-heure prend environ un mètre cube dans les bonnes machines.

Pour se rendre un compte au moins approximatif des déperditions, on peut les ranger sous les rubriques ci-après :

Pertes par les parois ;
Imperfection du cycle ;
Résistances passives ;
Combustion incomplète et allumage.

PERTES PAR LES PAROIS

Dans les moteurs en usage, le cylindre est en métal ; la combustion intérieure l'échauffe très vite.

Il est indispensable de refroidir le cylindre pour éviter le grippement, qui se produirait inévitablement au contact des garnitures du piston. Ici nous voyons apparaître de nouveau cette question des joints, cet obstacle pratique, qui se

dresse à chaque tentative que l'on fait pour améliorer le rendement. La suppression de cet obstacle semble dépendre de la solution de deux problèmes :

1° Découverte d'une matière qui puisse être polie comme le métal, qui en ait l'élasticité et la dureté et qui supporte mieux que lui les températures élevées ;

2° Découverte d'un joint étanche et lubrifiable aux températures élevées.

La perte de chaleur due au refroidissement de la paroi est considérable ; dans les meilleures machines existantes, elle s'élève souvent à la moitié de la puissance calorifique du combustible consommé.

On a cherché à l'atténuer par divers procédés. Par exemple, on produit l'explosion dans un récipient spécial, distinct du cylindre et à parois isolantes, et l'on interpose entre ce récipient et le cylindre un matelas de gaz inertes et froids. Il est facile de voir qu'avec une pareille combinaison, les gaz dilatés ne peuvent rendre en travail qu'une faible partie de la puissance élastique qu'ils renferment sous forme de chaleur : on gagne quelque chose sur les déperditions, on perd beaucoup sur l'effet dynamique.

Un autre moyen consiste à réserver pour l'allumage une portion de l'enceinte close du cylindre, en dehors de la partie qui reçoit le frottement du piston ; le volume ainsi réservé n'est pas ou est peu refroidi ; le refroidissement n'agit que sur la paroi frottante.

Le procédé qui jusqu'ici a donné les meilleurs effets consiste à imprimer une grande vitesse au piston, de telle sorte que, pendant la détente des gaz chauds, la durée de leur contact avec les parois refroidissantes soit aussi courte que possible. C'est par les grandes vitesses que l'on peut espérer se rapprocher de l'adiabatisme ; ce principe, inauguré il y a près d'un quart de siècle, a été pratiqué avec succès et a conduit aux plus brillants résultats ; il semble fort probable qu'avec les méthodes actuelles de construction, l'avenir des machines à explosion soit tout entier dans les allures rapides, une fois que l'on aura surmonté certaines difficultés pratiques, notamment celle de l'allumage.

IMPERFECTION DU CYCLE

Dans l'analyse que nous avons faite de l'emploi de la chaleur dans les machines à vapeur, nous avons évalué à 0,60 le coefficient de rendement du cycle, c'est-à-dire le rapport entre le travail indiqué et le travail théorique maximum.

Dans les machines à gaz, ce coefficient de 0,60 est bien loin d'être atteint. Les meilleures de ces machines donnent, à l'indicateur, des diagrammes qui n'ont aucun rapport avec le cycle de Carnot ; la détente devrait théoriquement refroidir les gaz jusqu'à la température ambiante ; or les gaz sortent extrêmement

chauds ; cette chaleur qu'emportent les gaz à l'échappement est la traduction physique de l'imperfection du cycle.

Il y a de grands progrès à réaliser dans cette direction. Peut-être l'usage de régénérateurs, si l'on arrive à les construire dans de bonnes conditions, pourra-t-il procurer des améliorations importantes.

RÉSISTANCES PASSIVES

A conditions égales, le cylindre d'une machine à gaz est beaucoup plus volumineux que celui d'une machine à vapeur ; souvent aussi, la machine est à simple effet, en vue d'un refroidissement plus efficace, et elle comporte une compression préalable de l'air. Il ne faut donc pas s'étonner si les frottements et résistances accessoires prennent une importance considérable. Si l'on compare le travail indiqué au travail recueilli sur l'arbre de couche, on arrive à un rendement organique assez faible.

Les machines à gaz exigent un graissage très abondant et très soigné, sinon les frottements absorbent la majeure partie du travail des pressions.

ALLUMAGE ET COMBUSTION IMPARFAITE

La combustion, dans les bonnes machines à gaz, semble en général assez complète ; le mélange préalable des éléments gazeux favorise l'accomplissement des réactions. Les gaz de l'échappement exhalent souvent une odeur très forte, mais cela ne prouve pas que les parties combustibles soient en grande abondance, eu égard à la grande puissance odoriférante de quantités même minimes d'acroléine, d'acétylène ou autres produits analogues. Il serait cependant à désirer que l'on fût mieux fixé sur ce point, qui n'a pas encore fait l'objet d'expériences nombreuses et précises.

Dans beaucoup de cas, notamment lorsqu'il s'agit de petites forces, la quantité de combustible dépensée pour assurer l'allumage, soit directement, sous forme d'une flamme, soit indirectement, sous forme d'une étincelle électrique, est loin d'être négligeable.

EFFET UTILE DES MOTEURS A EXPLOSION

Les quatre causes principales de perte que nous venons d'analyser expliquent suffisamment les résultats pratiques auxquels on arrive ; le rendement thermique des moteurs à explosion tombe presque au niveau de celui des bonnes machines à vapeur, quoique le coefficient économique soit environ trois fois plus grand.

D'un système de moteur à un autre, le résultat final est assez variable ; mais les coefficients individuels qui caractérisent les différentes déperditions varient dans les limites encore plus étendues. Il serait donc hors de propos de chercher à les évaluer en chiffres, même d'une manière approximative.

Toutefois on peut dire que, dans la plupart des cas, les deux déperditions prépondérantes sont dues à l'influence des parois et à l'imperfection du cycle.

PROCÉDÉS D'ALLUMAGE

Nous arrivons à l'examen rapide de quelques-uns des détails les plus importants nécessaires au fonctionnement des moteurs à explosion. Commençons par l'allumage.

La combustion étant très rapide, la flamme s'éteint après l'explosion ; il faut donc opérer un nouvel allumage à chacun des cycles d'opérations. Dans les moteurs en usage, le rallumage s'obtient par des procédés fort divers, et qui donnent presque tous des effets réguliers. Voici quelques-uns des plus répandus :

Par un jet de flamme : dans les moteurs sans compression préalable, le jet de flamme pénètre directement dans le mélange détonant par l'ouverture d'une petite soupape, qui se referme d'elle-même, dès que la pression intérieure devient prépondérante, par le fait même de l'explosion ; dans les moteurs à compression préalable, l'application de ce procédé d'allumage exige quelques dispositifs assez compliqués.

Par déplacement d'une flamme : un jet de gaz, allumé par une flamme fixe, est renfermé dans une cavité mobile, qui, par un léger et rapide déplacement, est mise en communication avec le mélange explosif ; l'allumage ainsi obtenu est fort régulier lorsque la machine est bien établie et convenablement réglée.

Par l'étincelle électrique : l'étincelle jaillit entre deux pointes métalliques isolées ; le courant à haute tension est fourni, soit par une bobine d'induction, soit par une petite dynamo actionnée par le moteur, soit enfin par un appareil assez analogue comme principe au *coup de poing* de Breguet, et dans lequel une bobine induite passe rapidement entre les pôles d'un aimant, sous l'action d'un fort ressort déclenché au moment voulu par le mouvement du moteur ; avec ce dernier dispositif, l'intensité de l'étincelle est indépendante de l'allure de la machine et la force absorbée par l'allumage est très petite.

L'allumage électrique nécessite quelques précautions d'installation et d'entretien, en vue d'éviter les dérivations du courant.

Par incandescence : un corps rendu incandescent, soit par le passage d'un courant électrique, soit par une flamme, est mis, au moment voulu, en contact avec le mélange explosif.

Dans tous ces procédés, l'allumage, provoqué en un point, s'étend, par propagation, à tout le mélange. On semble avoir trouvé avantage à faire varier le dosage, de telle sorte que la partie du mélange qui avoisine le point d'allumage soit plus riche que le reste en éléments combustibles.

Il est un procédé d'allumage qui, pour n'avoir pas été appliqué d'une manière tout à fait pratique, ne semble pas absolument inapplicable : il consiste à exercer sur le mélange explosif une *compression* qui l'échauffe et détermine la réaction ; si le mélange est déjà chaud et contenu dans une capacité chaude, il suffit d'une compression assez modérée pour le porter à la température d'inflammation ; avec ce procédé, la combustion se produirait presque instantanément dans toute la masse comprimée.

EAU CONSOMMÉE

Il faut, pour refroidir les parois, une assez grande quantité d'eau, qui souvent coûte cher ou est difficile à se procurer ; il serait fort avantageux, dans beaucoup de cas, de pouvoir échapper à cette sujétion. On y est parvenu, dans les petits moteurs, en augmentant l'action du rayonnement et de l'air extérieur au moyen de nervures à grande surface. Pour les moteurs un peu puissants, le résultat ainsi obtenu serait insuffisant. On a essayé aussi d'immerger le cylindre dans une bâche ouverte et pleine d'eau ; cette eau se vaporise à 100° au fur et à mesure que la chaleur lui est transmise ; la consommation d'eau se trouve ainsi fortement réduite.

ORGANES RÉGULATEURS DE LA VITESSE

Sur l'arbre de couche est monté un volant, destiné à amortir les variations périodiques du travail moteur. Ces variations, dans la plupart des moteurs à explosion, sont beaucoup plus étendues que dans les machines à vapeur, ce qui entraîne à donner au volant une grande puissance.

Pour réprimer les écarts permanents de régime, résultant d'inégalités durables entre le travail moteur et le travail résistant, on a généralement recours au régulateur à force centrifuge. Le régulateur agit de diverses manières.

Parfois, il agit par étranglement, en créant, sur le passage des courants gazeux, des pertes de charge variables. Ce mode d'action, très usité dans les machines à vapeur, est beaucoup plus limité dans ses résultats lorsqu'il s'applique à des machines à explosion.

Dans un grand nombre de machines à gaz, le régulateur agit sur l'admission du gaz combustible ; il est délicat de modifier la teneur du mélange explosif, dont la composition doit être maintenue entre des limites assez resserrées, au-

delà desquelles l'allumage ne se ferait plus ; ce moyen a cependant été appliqué dans certaines machines, et a pu réussir, grâce à des artifices ingénieux. Le plus souvent on procède autrement. La puissance de la machine est réglée de manière à l'emporter, en marche normale, sur le travail résistant ; la vitesse tend donc constamment à s'accroître ; dès qu'elle dépasse la limite fixée, le régulateur déplace une came, et l'admission se trouve supprimée pendant un ou plusieurs cycles ; la machine continue son mouvement en vertu de la force vive accumulée dans le volant ; quand la vitesse a suffisamment diminué, le régulateur reprend sa position ordinaire, et l'admission du gaz se rétablit.

Quelquefois aussi le régulateur agit, non sur l'admission, mais sur l'échappement.

L'action du régulateur à force centrifuge résulte de la force d'inertie des boules, force variable avec la vitesse. Dans quelques machines récentes, on a eu l'idée ingénieuse d'utiliser sous une autre forme la variation de la force d'inertie : la pièce mobile est oscillante et non pas tournante ; les régulateurs ainsi agencés sont parfois d'une grande simplicité.

Grâce à ces procédés et à l'aide d'un volant puissant, on peut maintenir une allure à peu près régulière. Les organes d'admission du gaz étant petits, tout le système régulateur peut être établi légèrement et tient peu de place. La dépense de gaz augmente et diminue en même temps que le travail à fournir.

Dans quelques machines de faible puissance et qui n'ont pas besoin d'une grande régularité de vitesse, le régulateur est supprimé ; pour empêcher la machine de s'emporter, il suffit d'étrangler l'arrivée du gaz ; quand la vitesse dépasse sa valeur normale, le mélange explosif devient trop pauvre et ne s'enflamme plus.

COMPRESSION PRÉALABLE

Dans certaines machines, les gaz, avant l'explosion, sont à la pression ambiante, et la pression motrice est due à l'élévation de température produite par l'explosion. D'autres machines procèdent d'un fonctionnement différent : le mélange explosif est comprimé avant d'être allumé.

Les machines sans compression préalable sont plus simples d'organes ; l'allumage se fait sans difficulté.

La compression préalable présente des avantages nombreux : la puissance est plus grande à égalité de volume et la chaleur en général mieux utilisée. De plus, au moment de l'explosion, les organes de transmission sont déjà comprimés, ce qui atténue les temps perdus et l'effet des chocs.

La compression est effectuée, tantôt par un piston spécial, tantôt dans le cylindre moteur lui-même. Ce dernier procédé est le plus en usage ; il est carac-

térisé sous le nom de *cycle à quatre temps*, ce cycle se composant de quatre opérations successives, exécutées dans le même cylindre, à savoir :

Aspiration du mélange explosif ;
Compression du mélange explosif ;
Explosion et détente ;
Expulsion des produits brûlés.

Le cycle à quatre temps présente cet avantage important, que le mélange se trouve réchauffé, d'un côté, par son contact avec les parois du cylindre, contact prolongé pendant deux courses du piston, d'un autre côté par le fait même de la compression ; il est donc dans de bonnes conditions pour s'enflammer, et, de fait, le cycle à quatre temps permet des dosages relativement faibles en gaz combustible.

Sur les quatre opérations, une seule, l'explosion et la détente, donne lieu à un travail moteur ; deux opérations, l'aspiration et l'expulsion, n'occasionnent qu'une faible dépense de travail ; la compression absorbe du travail. De plus, dans la plupart de ces machines, les pressions ne s'exercent que sur l'une des faces du piston ; l'autre face reste en contact avec l'air extérieur, qui concourt efficacement au refroidissement. En définitive, le mécanisme est assez mal utilisé ; là où une machine à vapeur donnerait quatre coups de piston utiles, la machine en question n'en donne qu'un, dont le travail est en partie absorbé par la période de compression.

Au point de vue de la régularité d'allure, ce système laisse aussi fort à désirer, le volant devant dépenser en deux tours le travail emmagasiné pendant une demi-révolution.

On pallie ces deux inconvénients en imprimant à la machine une grande vitesse de marche, vitesse qui cadre très bien, d'ailleurs, avec la réalisation de rendements élevés.

Lorsque, en outre, on cherche à obtenir une vitesse de rotation bien régulière, on attelle deux pistons sur un même arbre de couche, en croisant les périodes, de manière à avoir une impulsion à chaque révolution ; au besoin, quatre pistons attelés sur le même arbre donnent une régularité analogue à celle des machines à vapeur à double effet.

Le cycle à quatre temps a permis d'établir des machines à gaz solides et durables, d'un fonctionnement régulier, faciles à conduire et à entretenir, ayant un rendement thermique relativement élevé. Malgré le haut prix du combustible qu'elles consomment, elles ont été appliquées à de nombreuses industries et ont pris une extension rapide.

MACHINES MIXTES ET DIVERSES

Pour augmenter l'effet utile de la chaleur, on a cherché à adapter divers perfectionnements aux machines à air chaud. La plupart ont pour objet l'amélioration du cycle des machines à explosion, et surtout l'utilisation de la chaleur emportée par les gaz de l'échappement.

Dans certaines de ces machines, ces gaz, encore chauds et sous pression, sont envoyés dans un cylindre spécial où ils agissent sur un piston ; d'autres fois, ces gaz servent à chauffer une petite chaudière, alimentant un piston de machine à vapeur. Les résultats ainsi obtenus ne sont pas encore bien nets ; la question a besoin d'être étudiée.

D'autres inventeurs, en poursuivant les applications de la puissance de la chaleur à la navigation, ont poussé leurs recherches dans une voie toute différente : ils suppriment piston, machine et propulseur, et font agir directement la pression des gaz à l'arrière du bateau, sur l'eau dans laquelle il flotte. Quand aux substances employées pour développer la pression, elles sont très diverses ; tantôt la combustion est continue et ce sont les gaz provenant de cette combustion qui servent d'agents propulseurs ; d'autres fois on a recours à des mélanges gazeux explosifs ; dans certains cas, on a même cherché à faire usage d'explosifs solides, tels que les poudres lentes ou le pyroxyle. Ces expériences n'ont fourni, jusqu'ici, rien de pratique ; mais elles ont donné lieu à de regrettables accidents. L'idée paraît assez séduisante et ne semble se heurter contre aucune impossibilité théorique ; il est possible que cette voie conduise, un jour ou l'autre, à des résultats utiles, surtout en vue de certaines applications spéciales, telles que les torpilles auto mobiles, etc.

QUESTIONS DIVERSES

Nous mentionnerons encore quelques problèmes qui se sont posés dans la pratique de ces moteurs.

En premier lieu, vient la question du graissage ; elle est ici particulièrement importante et délicate, à cause de la valeur élevée des résistances dues aux frottements, et des difficultés qu'occasionnent les fluides à température élevée, et surtout l'air chaud.

La mise en train, qui, abstraction faite de la montée en pression de la chaudière, est si facile dans les machines à vapeur, ne laisse pas ici que de donner lieu à des embarras, surtout pour les moteurs à compression préalable. Il en est de même du changement de marche. Ces problèmes ont été plus ou moins résolus par divers procédés, sur lesquels il est inutile d'insister.

Bien d'autres questions se présentent encore, telles que celle des mélangeurs

de gaz, celle de l'expulsion totale ou partielle des produits de la combustion celle des agencements mécaniques des moteurs, etc. Mais, si grand que puisse être l'intérêt qu'elles présentent, cet intérêt ne semble par d'ordre assez général pour mériter ici autre chose qu'un rappel.

Pour terminer, disons un mot des applications les plus habituelles qu'ont reçues les moteurs thermiques.

DE L'EMPLOI DES DIVERS MOTEURS THERMIQUES. INSTALLATIONS FIXES

Parlons d'abord des installations fixes.

Lorsqu'il s'agit de produire à bon marché une force motrice puissante et continue, la machine à vapeur ordinaire reste encore le moteur industriel par excellence. Les autres machines thermiques n'ont reçu, dans de pareilles conditions, que des applications isolées et justifiées par des conditions économiques spéciales; pour que la situation fût modifiée, il faudrait sans doute que de grandes améliorations fussent apportées dans la construction de ces moteurs; ceux qui consomment des combustibles solides, soit directement, soit après transformation par gazogène, se prêtent peut-être mieux que d'autres à une pareille transformation.

Pour les puissances de quelques chevaux, les machines thermiques, et surtout les machines à explosion, ont pris une large place dans l'industrie ; leurs avantages sont surtout manifestes lorsque le service à faire est intermittent. C'est principalement la machine à gaz avec cycle à quatre temps qui a donné lieu à de nombreuses applications.

Pour les petites forces, lorsque la question de commodité d'emploi est prédominante, la machine à vapeur cesse d'être à sa place, et les divers moteurs thermiques rendent des services chaque jour plus appréciés.

INSTALLATIONS MOBILES

Les machines thermiques, telles qu'on les construit aujourd'hui, sont encore trop lourdes, trop encombrantes et trop délicates pour avoir donné lieu à des applications importantes dans le cas d'installations mobiles.

Quelques essais de ces machines ont été tentés pour la traction des tramways.

En matière de navigation, les machines à vapeurs combinées ne semblent pas avoir dit leur dernier mot.

Quant aux machines à air chaud, pour qu'elles puissent être appliquées d'une façon courante aux transports, elles auraient besoin, avant tout, d'être rendues plus légères ; pour réaliser cette amélioration, certains perfectionnements s'indi-

quent d'eux-mêmes, et mériteraient d'être étudiés, tels que l'emploi de hautes pressions et de grandes vitesses, la simplification des cycles, l'usage des combustibles liquides, etc.

Peut-être un avenir prochain nous réserve-t-il à cet égard des surprises.

QUESTIONS A EXAMINER PAR LE CONGRÈS

Nous avons essayé, dans ce qui précède, d'énumérer quelques-uns des sujets d'étude qui se présentent à propos des moteurs thermiques. Si imparfaite que soit cette esquisse, il faut espérer qu'elle ne sera pas sans quelque utilité, qu'elle pourra provoquer les communications des savants ingénieurs qui ont étudié la matière, qu'elle soulèvera des discussions instructives.

On trouvera ci-après une liste des principales questions qu'il pourrait être intéressant d'examiner dans les séances du Congrès. Nous prenons la liberté de les soumettre aux réflexions de nos collègues. L'ordre observé dans cette liste est, à peu de chose près, le même que celui qui a été suivi dans le cours du présent rapport, ce qui facilitera les rapprochements.

Machines à vapeur d'eau surchauffée. — Descriptions et résultats.

Machines à vapeur diverses. — Descriptions et résultats.— Propriétés physiques de diverses vapeurs.— Propriétés au point de vue de l'innocuité, du graissage, de l'étanchéité des joints, etc.

Machines à air chaud. — Descriptions et résultats. — Joints et graissage. — Construction des régénérateurs de chaleur.

Machines à air chaud à combustible solide. — Descriptions et résultats.

Combustibles gazeux et liquides.— Gazogènes.— Allumage des liquides.

Machines à explosion.— Descriptions et résultats.— Etudes sur la combustion des mélanges détonants.

Études expérimentales de machines thermiques. — Etude du combustible. — Travail indiqué.— Travail effectif.— Rendement organique.— Etude des gaz d'échappement.— Rendement thermique.

Procédés d'allumage.

Régulateurs de vitesse.

Influence de la compression préalable.

Joints, graissage, mise en train, organes divers.

Données statistiques sur les machines thermiques.

NOTE

SUR UN

FREIN DYNAMOMETRIQUE UNIVERSEL

à lecture directe de travail

PAR

M. TROUVÉ

Les progrès incessants et rapides de l'industrie en général, et de l'électricité en particulier, rendent de jour en jour plus nécessaire l'emploi d'un appareil permettant de mesurer soit le travail produit par les générateurs de force motrice, soit au contraire le travail absorbé par les appareils mis en mouvement.

Il est, en effet, très important de pouvoir se rendre un compte exact de la relation qui existe entre le travail produit par l'agent employé : électricité, eau, air, vapeur, gaz, etc... et celui absorbé et transformé utilement par les nombreuses machines que l'industrie emploie.

L'étude des dynamomètres est une de celles qui intéressent le plus vivement à la fois les mécaniciens et les électriciens ; le manque d'un bon dynamomètre de transmission a souvent donné lieu à de fortes méprises dans les calculs de rendement.

Travaillant aussi cette question, M. Trouvé est parvenu à construire un dynamomètre, soit d'absorption, soit de transmission, d'une simplicité remarquable.

Les appareils employés dans ce but et que l'on nomme : *freins dynamométriques* ou *dynamomètres* suivant leur genre de construction et leur mode d'emploi sont généralement peu applicables aux petites machines.

Le frein de *Prony*, le plus répandu d'entre eux, n'est pas d'une installation ni d'une application faciles ; son emploi demande beaucoup de précautions pour n'être pas dangereux et les opérateurs qui l'appliquent doivent posséder les connaissances nécessaires et les formules qui en expriment les résultats. On peut sur-

tout lui reprocher de manquer de sensibilité et de ne pas donner d'une façon constante et permanente les deux facteurs du travail. Aussi les résultats ne sont-ils pas toujours d'une concordance et d'une exactitude absolues.

M. Trouvé a été conduit par le besoin fréquent de l'emploi de ces appareils, à combiner un appareil de mesure d'un usage général, simple dans son installation, sûr dans ses indications et dont les résultats puissent être, à chaque instant, établis, lus et compris sans le secours d'opérations mathématiques, par tous ceux intéressés à l'emploi et préposés à la conduite des machines.

Il fallait, pour arriver à ce but, éviter les inconvénients de la force centrifuge dus aux masses en mouvement d'appareils lourds et encombrants, et ramener toujours à la vue, et à tout moment, les mesures d'efforts et de vitesses avec leurs variations.

C'est à quoi répond le dynamomètre dont la description suit :

L'appareil de M. Trouvé comporte deux parties distinctes :

1° Celle destinée à mesurer les efforts ;

2° Celle qui indique les vitesses ou plus exactement le chemin correspondant parcouru par l'effort.

Le travail, produit de ces deux facteurs, est représenté par l'expression : $\overset{\text{travail}}{T} = \overset{\text{effort}}{E} \times \overset{\text{vitesse}}{V}$ et l'on verra, par ce qui va suivre, que l'appareil de M. Trouvé donne à tout instant et toujours la valeur des deux facteurs de ce produit.

Ire PARTIE. — MESURE DES EFFORTS

La mesure de l'effort peut être obtenue par un grand nombre de ressorts dynamométriques de formes variées.

M. Trouvé a choisi de préférence un ressort à lame élastique plate, fig. I, vue K, n° 7, qu'il loge dans l'axe même du dynamomètre pour le soustraire d'une part aux chocs extérieurs et d'autre part pour éliminer toute cause de pertubation dans les indications par suite de la force centrifuge qui, ici, n'a aucune prise. Cette lame travaille à la torsion, sans frottement, loin de sa limite d'élasticité, de manière à lui assurer une constante rigoureuse.

L'axe que traverse cette lame est creux et il est composé de deux tubes se recouvrant concentriquement ; les deux extrémités de la lame sont fixées à ces tubes qui peuvent suivre les mouvements de rotation et de glissement longitudinal (ce dernier insignifiant) que leur imprime la torsion de la lame.

Un des tubes comporte un manchon fixe découpé en plan incliné B (figures 2 et 3).

Un autre manchon semblable B', libre sur le second tube, est constamment ramené contre le manchon fixe par un léger ressort antagoniste F, à boudin, de

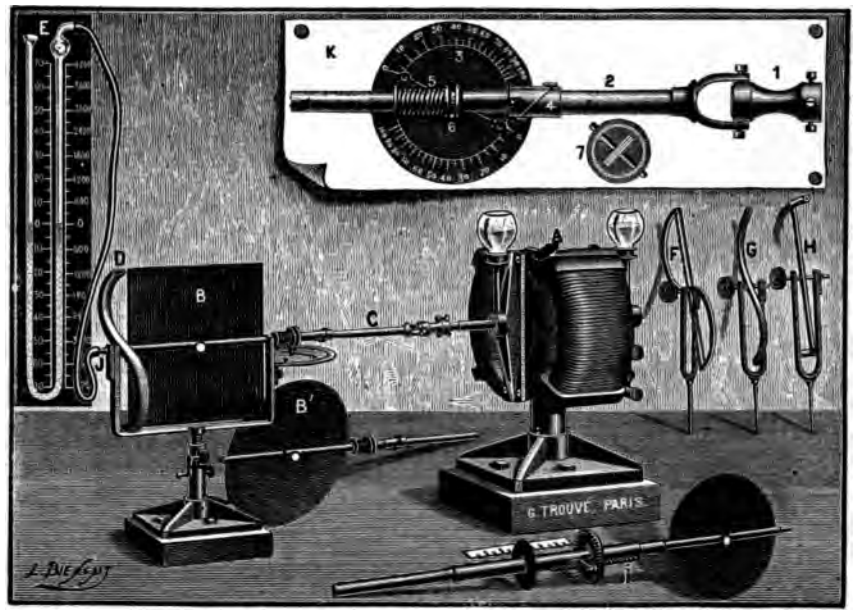


FIG. 1.

A, Moteur en expérience pouvant développer 30 à 40 kilogrammètres.

B, B', Freins dynamométriques d'absorption à palette carrée et circulaire appropriés à la mesure des petites forces, depuis celles de quelques grammètres, jusqu'à celles de 40 kilogrammètres.

C, Dynamomètre à indication curviligne de l'effort sur un cadran dont on voit les détails amplifiés en K au sommet de la figure.

D, Compte-tours en S agissant par aspiration sur le manomètre E.

E, Manomètre à liquide.

F, Compte-tours en S à section carrée.

G, Compte-tours également en S à section ovoïde.

H, Compte-tours à branches droites avec ajutages mobiles aux extrémités pour fonctionner dans les deux sens.

I, Dynamomètre à indication rectiligne de l'effort par le jeu d'un manchon à crémaillère et à pignon.

J, Presse-étoupe pour assurer l'étanchéité entre le tourniquet D et le manomètre E.

K, Détails amplifiés du dynamomètre.

1, Manchon universel à la Cardan s'adaptant sur l'arbre du moteur en expérience.

2, Dynamomètre à ressort plat fixé par chacune de ses extrémités à deux tubes concentriques constituant l'axe du système et dont les positions relatives déterminent les différents degrés de torsion du ressort dynamométrique indiqués par une aiguille sur le cadran 3.

3, Cadran gradué empiriquement indiquant les efforts dynamométriques.

4, Plans inclinés transformant le mouvement de torsion du ressort en mouve-

ment longitudinal actionnant soit l'aiguille du cadran 3, soit la crémaillère du mouvement rectiligne de l'index du dynamomètre I.

5, Ressort antagoniste ramenant la partie mobile du manchon dans sa position normale au repos.

6, Gorge profonde sur le manchon mobile dans laquelle s'engage l'arbre coudé de l'aiguille pour l'entraîner dans son mouvement.

7, Coupe transversale du ressort dynamométrique, qui peut être composé d'une ou de plusieurs lames.

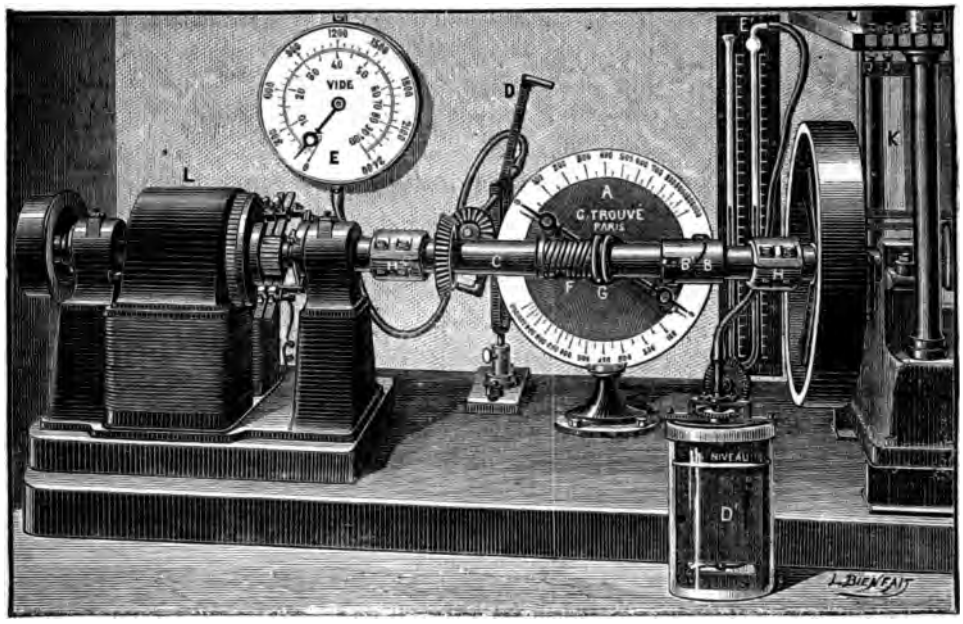


FIG. 2. — DYNAMOMÈTRE D'ABSORPTION PAR MACHINE DYNAMO-ÉLECTRIQUE

A, Cadran gradué empiriquement, indiquant l'effort dynamométrique.

B, B' Manchons fixe et mobile à plans inclinés transformant le mouvement de torsion du ressort dynamométrique en mouvement rectiligne pour actionner l'aiguille dans son mouvement curviligne sur le cadran A.

C, Arbre du dynamomètre.

D, Compte-tour ou tourniquet à branches droites, avec coudes mobiles aux extrémités participant au mouvement de l'appareil dynamométrique par l'intermédiaire d'un engrenage d'angle multiplicateur et agissant par aspiration sur le manomètre E.

D, Compte-tour ou tourniquet en S évoluant dans un liquide contenu dans un récipient à niveau constant pour augmenter la sensibilité des indications fournies par le manomètre à colonne liquide E'. Le vase D' est cloisonné de manière à empêcher le mouvement tourbillonnaire du liquide.

E, E', Manomètres métalliques et à colonne liquide, très sensibles, gradués empiriquement et mis en rapport avec leur tourniquet respectif par l'intermédiaire d'un tube métallique ou de caoutchouc suffisamment résistant pour ne pas modifier la valeur des indications.

F, Ressort antagoniste ramenant le manchon à plan incliné B' sur le plan incliné du manchon fixe B dans sa position normale au repos.

G, Gorge profonde du manchon mobile B'.

H, H' Manchons à écrou reliant l'appareil dynamométrique au moteur K et à la dynamo L.

K, Machine motrice à vapeur.

L, Machine dynamo d'absorption dans le circuit de laquelle on intercale des résistances variables de convention ou utiles, suivant les conditions de l'expérience.

manière qu'au repos les deux plans inclinés s'appliquent l'un contre l'autre (1). Le manchon mobile B' est muni d'une coulisse qui ne lui laisse prendre sur le second tube, qu'un mouvement longitudinal sous l'action des efforts de torsion exercés sur l'axe du système.

C'est ce mouvement longitudinal de ce manchon qui est utilisé pour conduire l'aiguille indicatrice des efforts sur un cadran A où sont inscrites empiriquement leurs variations.

A cet effet, le manchon mobile B' est muni d'une gorge profonde G dans laquelle s'engage l'extrémité d'un petit arbre coudé porté par l'aiguille.

Le cadran est gradué empiriquement de la manière suivante :

L'axe du ressort dynamométrique étant solidement relié d'un bout à l'arbre du moteur, on fixe à l'autre extrémité du ressort un double levier équilibré dont le rayon (0^m1592) correspond très exactement à une circonférence de 1 mètre de développement, de sorte que chaque kilogramme appliqué au bout de ce bras de levier représente un travail égal à un kilogrammètre par tour du système.

A une extrémité de ce levier, constituant une véritable balance, on charge l'un des plateaux de poids successifs jusqu'à ce qu'on ait atteint le maximum de torsion que l'on veut donner au ressort, limité ici par deux buttoirs, à 180° dans chaque sens, mais pendant ce temps, on fait opérer au moteur, lentement, le mouvement circulaire nécessaire pour tenir le levier chargé dans la position parfaitement horizontale. On note, à ce moment, la position de l'aiguille sur le cadran et on y inscrit l'effort représenté par le nombre de kilogrammes dont est chargé le plateau, supposons 100 kilogrammes.

On retire successivement 1,2,3,4... kilogrammes jusqu'à ce qu'on arrive à

1. Au début M. Trouvé avait employé un pas hélicoïdal mais les indications du dynamomètre n'avaient lieu que lorsque celui-ci tournait dans un sens déterminé; avec les plans inclinés, les indications sont toujours exactes et ont toujours lieu, sans qu'on ait à se préoccuper ni du sens du mouvement, ni de la position relative des machines entre elles.

0 kilogramme, en ayant soin, pour chacune de ces opérations, de maintenir très exactement la position horizontale de la balance, en détournant le moteur de la quantité voulue.

Chacune des positions de l'aiguille sera marquée sur le cadran, comme précédemment, avec indication de l'effort correspondant au poids tenu en équilibre.

De cette manière, la graduation du cadran ayant été faite du *maximum* au *minimum*, sera toujours plus exacte que la graduation faite en sens contraire.

Les efforts seront déterminés de cette manière avec la plus grande précision et toute erreur d'appréciation se trouve éliminée : tout se borne à lire les chiffres indiqués par l'aiguille sur le cadran qui donne ainsi toutes les valeurs de l'effort E.

IIme PARTIE. — MESURE DES VITESSES

Un grand nombre d'appareils déjà connus, disposés en compteurs de tours d'une manière passagère ou permanente auraient pu donner les indications nécessaires si M. Trouvé n'avait eu pour but d'atteindre ici encore la plus grande simplicité.

Le compteur auquel il s'est arrêté, pour les dynamomètres destinés aux petites forces est simplement composé d'un tube formant tourniquet, monté en son milieu sur un axe creux avec lequel il communique, mis en relation par un tube en caoutchouc avec un manomètre soit à liquide, soit métallique E (fig. 2).

Ce tourniquet peut être monté directement sur le prolongement de l'axe même du dynamomètre ou participer à son mouvement par un mode quelconque de transmission sans glissement.

Un petit presse-étoupe assure toujours l'étanchéité de la communication entre le tourniquet et le manomètre.

Les choses étant ainsi disposées, on comprend que le tourniquet participant au mouvement de tout le système, il se produit une sorte de succion de l'air par les orifices libres de ce tourniquet, ce qui détermine une dépression dans la colonne barométrique qui a pour résultat de faire varier le niveau de cette colonne ou le déplacement de l'aiguille du manomètre.

Les indications seront d'autant plus accentuées que les dépressions seront plus grandes par le fait même d'une plus grande vitesse.

Ce montage direct du tourniquet sur l'axe convient dans la plupart des cas lorsque l'on possède une certaine vitesse ; mais dans les cas de petites vitesses, il y a avantage à le commander en dehors de l'axe par une transmission sans glissement qui augmente au besoin son nombre de tours.

M. Trouvé signale encore plusieurs moyens employés par lui pour augmenter l'amplitude des indications ; un premier moyen consiste à faire varier l'inclinai-

son de la colonne liquide, de manière que la pression qu'elle exerce soit plus faible ; il est évident que plus on se rapprochera de l'horizontale, sans y atteindre cependant, plus l'appareil sera sensible et plus les indications fournies seront amplifiées.

Un autre moyen très efficace consiste à faire évoluer le tourniquet D (fig. 2) dans un milieu plus dense que l'air D' : l'eau ou le mercure par exemple. Dans ces conditions, les indications atteignent une amplitude considérable en rapport avec les différences de densité et elles restent toujours exactes, en maintenant constant le niveau du liquide employé et en l'empêchant de participer au mouvement tourbillonnaire que produit le tourniquet par une cloison de bas en haut qui divise le vase en deux parties et dont une fenêtre pratiquée dans la cloison, livre juste passage au tourniquet.

Le tourniquet indicateur de vitesse disposé dans l'une ou l'autre des conditions qui viennent d'être décrites, est prêt à recevoir sa graduation qui s'opère alors empiriquement comme pour les efforts.

Pour cela, il est mis en relation avec un moteur qui lui imprime des vitesses croissantes depuis le repos jusqu'à sa limite extrême.

On note chaque déplacement de la colonne liquide ou de l'aiguille du manomètre et on inscrit en regard le nombre de tours correspondant, déterminé très exactement par un compteur totalisateur de tours très exact. Le tourniquet ne changeant pas, les déplacements correspondent toujours aux mêmes vitesses. La vérification en est du reste facile et, dans certains cas, les variations de la colonne liquide atteignent plusieurs mètres. On comprend dès lors que les positions intermédiaires accusent facilement des fractions très minimes de la vitesse.

La sensibilité et l'amplitude des indications dépendent de la vitesse que l'on imprime au tourniquet et du milieu dans lequel il se meut ; il en résulte que ces deux propriétés de l'appareil n'ont pour ainsi dire pas de limite. On aura ainsi la valeur de V avec une approximation aussi grande qu'on le voudra.

EMPLOI DU DYNAMOMETRE UNIVERSEL

L'appareil dynamométrique de M. Trouvé ainsi établi devient à volonté un frein d'absorption ou de distribution selon qu'on l'applique isolément sur une machine dont on veut mesurer le travail moteur ou selon qu'on s'en sert pour mesurer le travail absorbé, en reliant par ce dynamomètre la machine motrice et la machine réceptrice.

FREIN D'ABSORPTION DYNAMOMÉTRIQUE.

Le frein dynamométrique de M. Trouvé disposé en absorption permettant, ainsi qu'on va le voir, la mesure du travail sur les plus petites machines comme

sur les plus puissantes, répond à tous les besoins de l'industrie pour lesquels les différents modèles ont été établis.

Pour les petites machines animées d'une grande vitesse angulaire, comme c'est le cas le plus général pour les machines électriques, l'absorption se fait par un volant à ailettes plates indéformables en rotation dans l'air et dont les dimensions varient suivant les efforts du travail à mesurer (1).

La figure 1 montre une disposition particulière de l'appareil pour son application à l'essai d'une machine de 30 à 40 kilogrammètres et dont la vitesse de régime correspond à environ 2 400 tours par minute.

Le frein d'absorption monté sur l'axe est une palette rectangulaire B, mais elle pourrait être remplacée par une hélice, par un disque B', cette forme circulaire présentant l'avantage considérable par son genre de fabrication à l'emporte-pièce, de pouvoir se trouver toujours d'une exécution identique.

Une série de palettes, de dimensions progressives, pouvant se monter rapidement sur l'axe à la place les unes des autres, permet de choisir celle qui correspond le mieux à la vitesse de régime du moteur, on a ainsi toutes les facilités d'essayer celui-ci à différentes vitesses et de déterminer la palette qui représente le maximum de travail.

Dans ces différents essais, on a eu soin d'observer les efforts et les vitesses angulaires correspondant à l'emploi de chacune des palettes et de déterminer le travail résultant.

Dans ce cas particulier, on peut même, en regard du prolongement de l'aiguille des efforts, (elle est double) tracer sur l'autre moitié du cadran, directement le travail dans chacun des cas de même vitesse et de même effort, condition qui se présente fréquemment quand on a à essayer une série de machines identiques sous tous les rapports, car ici l'effort est fonction de la vitesse angulaire.

Trois courbes d'étalonnage, établies expérimentalement une fois pour toutes, permettent de reconnaître, par une seule observation, la vitesse angulaire, le couple exercé et la puissance produite.

Les mêmes effets sont obtenus avec le dynamomètre I à indications rectilignes sur une règle graduée.

Les vues F G H (fig. 1) représentent diverses formes que l'on peut donner au tourniquet, formes qui n'ont, en réalité, que très peu d'influence sur la raré-

1. Au premier abord on peut être snrpris qu'on puisse faire absorber le travail par un frein d'absorption prenant son point d'appui dans l'air. Mais on le sera moins quand on saura que, d'après les expériences faites sur un moteur électrique de M. Trouvé, un travail de 78 kilogrammètres est absorbé, à une vitesse de 2320 tours par minute, par un poids net de 1800 grammes équilibrant l'entraînement sur un levier de $0^m,1592$.

faction de l'air ; en pratique, M. Trouvé s'est arrêté à la forme droite pour laquelle le sens du mouvement est indifférent.

La partie supérieure K du dessin représente toutes les parties du dynamomètre amplifiées et la légende explicative placée au-dessous de la figure, complète d'une façon plus détaillée cette description générale. Pour des efforts plus considérables et des vitesses moins grandes, les palettes peuvent tourner dans un milieu plus dense tel que l'eau ou le mercure, et fonctionner comme il a déjà été expliqué pour le tourniquet, dans des vases ou grandes cuves où le mouvement tourbillonnaire est paralysé. Pour les moteurs de grande puissance à vitesse lente ou rapide, l'absorption se fait par une machine dynamo-électrique appropriée, dans le circuit de laquelle on intercale des résistances variables de convention ou utiles suivant les conditions de l'expérience.

La figure 2 représente un frein dynamométrique placé dans ces conditions : d'un côté, la machine motrice K (qui est ici une machine à vapeur), est reliée par l'intermédiaire du dynamomètre, à une machine électrique d'absorption L.

Le dynamomètre de M. Trouvé possède, en outre de la particularité de pouvoir tourner dans les deux sens indifféremment, celle de pouvoir intervertir à volonté les positions de la force motrice et de la résistance.

Dans le cas spécial de machines de très grandes forces, machines puissantes d'usines ou de bâtiments de guerre ou de transport, ce dynamomètre s'applique avec une simplicité remarquable, sans entraîner de modifications des arbres en mouvement.

En effet, un arbre plein, quel que soit son diamètre, peut être considéré comme un ensemble de lames de ressorts juxtaposés, et les différents déplacements circulaires dus à son mouvement de torsion deviennent appréciables et peuvent être lus aussi facilement que dans les dispositions précédentes en amplifiant les indications.

L'arbre lui-même faisant alors l'office de la lame de ressort, M. Trouvé place sur son contour de l'arbre, depuis le point d'application de la puissance jusqu'à celui de la résistance, une enveloppe métallique fixée entre ces deux points et qui est séparée en deux parties au milieu de sa longueur ; ces deux parties ne sont intéressées qu'au mouvement de torsion sans participer à aucun des autres efforts ; M. Trouvé reconstitue alors, à l'aide de ses deux manchons, l'un fixe, l'autre mobile, le dynamomètre décrit précédemment avec tous ses éléments, soit le cadran pour les efforts, — et le tourniquet, actionné par un mouvement multiplicateur, pour les vitesses angulaires.

Il est à remarquer que, dans le cas spécial des machines marines, c'est l'hélice même du bâtiment qui est utilisée comme frein d'absorption.

sur les plus puissantes, répond à tous les besoins de l'industrie pour lesquels les différents modèles ont été établis.

Pour les petites machines animées d'une grande vitesse angulaire, comme c'est le cas le plus général pour les machines électriques, l'absorption se fait par un volant à ailettes plates indéformables en rotation dans l'air et dont les dimensions varient suivant les efforts du travail à mesurer (1).

La figure 1 montre une disposition particulière de l'appareil pour son application à l'essai d'une machine de 30 à 40 kilogrammètres et dont la vitesse de régime correspond à environ 2 400 tours par minute.

Le frein d'absorption monté sur l'axe est une palette rectangulaire B, mais elle pourrait être remplacée par une hélice, par un disque B', cette forme circulaire présentant l'avantage considérable par son genre de fabrication à l'emporte-pièce, de pouvoir se trouver toujours d'une exécution identique.

Une série de palettes, de dimensions progressives, pouvant se monter rapidement sur l'axe à la place les unes des autres, permet de choisir celle qui correspond le mieux à la vitesse de régime du moteur, on a ainsi toutes les facilités d'essayer celui-ci à différentes vitesses et de déterminer la palette qui représente le maximum de travail.

Dans ces différents essais, on a eu soin d'observer les efforts et les vitesses angulaires correspondant à l'emploi de chacune des palettes et de déterminer le travail résultant.

Dans ce cas particulier, on peut même, en regard du prolongement de l'aiguille des efforts, (elle est double) tracer sur l'autre moitié du cadran, directement le travail dans chacun des cas de même vitesse et de même effort, condition qui se présente fréquemment quand on a à essayer une série de machines identiques sous tous les rapports, car ici l'effort est fonction de la vitesse angulaire.

Trois courbes d'étalonnage, établies expérimentalement une fois pour toutes, permettent de reconnaître, par une seule observation, la vitesse angulaire, le couple exercé et la puissance produite.

Les mêmes effets sont obtenus avec le dynamomètre I à indications rectilignes sur une règle graduée.

Les vues F G H (fig. 1) représentent diverses formes que l'on peut donner au tourniquet, formes qui n'ont, en réalité, que très peu d'influence sur la raré-

1. Au premier abord on peut être snrpris qu'on puisse faire absorber le travail par un frein d'absorption prenant son point d'appui dans l'air. Mais on le sera moins quand on saura que, d'après les expériences faites sur un moteur électrique de M. Trouvé, un travail de 78 kilogrammètres est absorbé, à une vitesse de 2320 tours par minute, par un poids net de 1800 grammes équilibrant l'entraînement sur un levier de $0^m,1592$.

faction de l'air ; en pratique, M. Trouvé s'est arrêté à la forme droite pour laquelle le sens du mouvement est indifférent.

La partie supérieure K du dessin représente toutes les parties du dynamomètre amplifiées et la légende explicative placée au-dessous de la figure, complète d'une façon plus détaillée cette description générale. Pour des efforts plus considérables et des vitesses moins grandes, les palettes peuvent tourner dans un milieu plus dense tel que l'eau ou le mercure, et fonctionner comme il a déjà été expliqué pour le tourniquet, dans des vases ou grandes cuves où le mouvement tourbillonnaire est paralysé. Pour les moteurs de grande puissance à vitesse lente ou rapide, l'absorption se fait par une machine dynamo-électrique appropriée, dans le circuit de laquelle on intercale des résistances variables de convention ou utiles suivant les conditions de l'expérience.

La figure 2 représente un frein dynamométrique placé dans ces conditions : d'un côté, la machine motrice K (qui est ici une machine à vapeur), est reliée par l'intermédiaire du dynamomètre, à une machine électrique d'absorption L.

Le dynamomètre de M. Trouvé possède, en outre de la particularité de pouvoir tourner dans les deux sens indifféremment, celle de pouvoir intervertir à volonté les positions de la force motrice et de la résistance.

Dans le cas spécial de machines de très grandes forces, machines puissantes d'usines ou de bâtiments de guerre ou de transport, ce dynamomètre s'applique avec une simplicité remarquable, sans entraîner de modifications des arbres en mouvement.

En effet, un arbre plein, quel que soit son diamètre, peut être considéré comme un ensemble de lames de ressorts juxtaposés, et les différents déplacements circulaires dus à son mouvement de torsion deviennent appréciables et peuvent être lus aussi facilement que dans les dispositions précédentes en amplifiant les indications.

L'arbre lui-même faisant alors l'office de la lame de ressort, M. Trouvé place sur son contour de l'arbre, depuis le point d'application de la puissance jusqu'à celui de la résistance, une enveloppe métallique fixée entre ces deux points et qui est séparée en deux parties au milieu de sa longueur ; ces deux parties ne sont intéressées qu'au mouvement de torsion sans participer à aucun des autres efforts ; M. Trouvé reconstitue alors, à l'aide de ses deux manchons, l'un fixe, l'autre mobile, le dynamomètre décrit précédemment avec tous ses éléments, soit le cadran pour les efforts, — et le tourniquet, actionné par un mouvement multiplicateur, pour les vitesses angulaires.

Il est à remarquer que, dans le cas spécial des machines marines, c'est l'hélice même du bâtiment qui est utilisée comme frein d'absorption.

FREIN DE DISTRIBUTION DYNAMOMÉTRIQUE.

Le frein de distribution, comportant exactement les mêmes organes que les précédents, se comprend facilement à l'inspection de la figure 3.

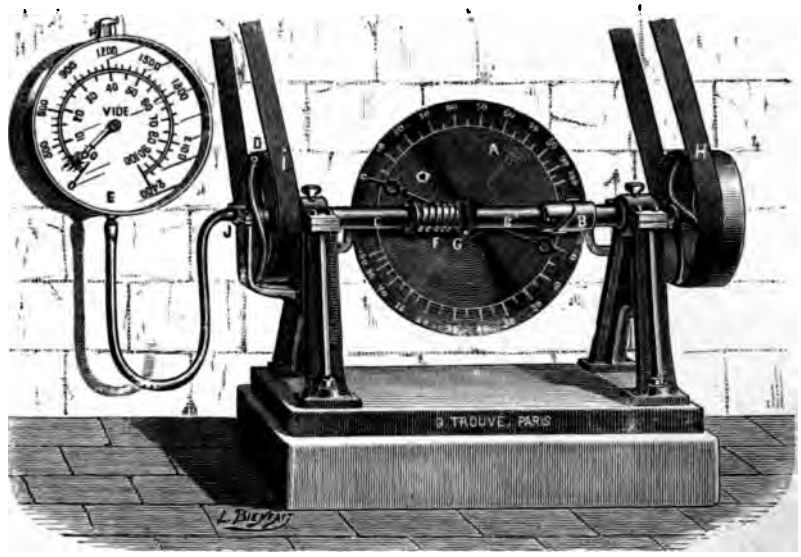


FIG. 3. — DYNAMOMÈTRE DE DISTRIBUTION SUR BATI

A, Cadran gradué empiriquement, indiquant l'effort dynamométrique.
B, B', Manchons fixe et mobile à plans inclinés transformant le mouvement de torsion du ressort dynamométrique en mouvement rectiligne pour actionner l'aiguille du cadran A.
C, Arbre du dynamomètre dont on voit les détails sur la fig. 1, vue K.
D, Compte-tours en S placé directement sur l'axe du dynamomètre et agissant par aspiration sur le manomètre E.
E, Manomètre métallique très sensible gradué empiriquement.
F, Ressort antagoniste à boudin ramenant le manchon mobile B' dans sa position normale au repos.
G, Gorge profonde du manchon mobile B' sur une manivelle placée sur la circonférence de l'axe de l'aiguille du cadran A et actionnant cette aiguille.
H, Poulies fixe et folle de commande recevant la courroie du moteur.
I, Poulie de transmission.
J, Presse-étoupe pour assurer l'étanchéité entre le manomètre E et le tourniquet D.

Au lieu de servir de relation directe entre le moteur et le récepteur, il est actionné d'un bout par un moteur et par l'intermédiaire de courroies ou d'engrenages et il retransmet à l'autre bout par les mêmes moyens, la force à une autre

machine. Comme précédemment, les deux éléments du travail sont indiqués constamment par la lecture directe.

Malgré les résultats énumérés ci-dessus, M. Trouvé pensant que les mécaniciens accueilleraient plus favorablement un appareil entièrement mécanique, supprimant le tourniquet ou tube à réaction eut l'idée d'appliquer, à la mesure des vitesses, le même principe et les mêmes organes qu'il a imaginés pour la mesure des efforts.

M. Trouvé a donc ajouté à son dynamomètre de la mesure des efforts un appareil en tout semblable, mais de dimensions trés réduites, qui sert d'indicateur de vitesse. Ce modèle définitif, le dynamomètre de M. Trouvé constitue par son ensemble robuste, d'une simplicité remarquable, difficile à surpasser, un nouvel organe mécanique pour la mesure du travail, de la plus haute valeur.

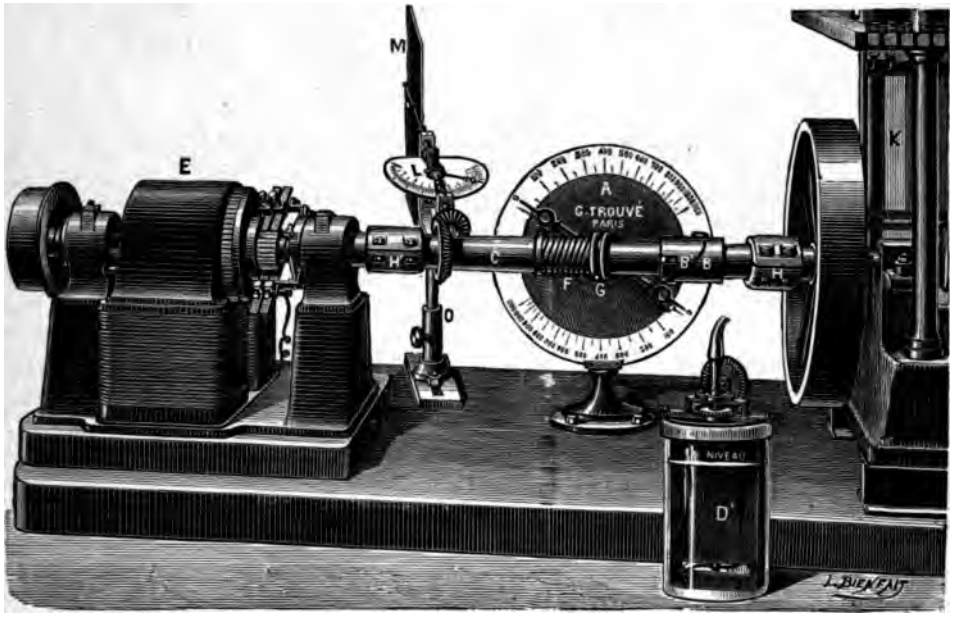


FIG. 4. - DYNAMOMÈTRE D'ABSORPTION PAR MACHINE DYNAMO-ÉLECTRIQUE (MODÈLE DÉFINITIF) DE M. TROUVÉ

A, Cadran indicateur de l'effort dynamométrique.

B, B', Manchons inclinés; B est fixe sur l'arbre C, B' est mobile dans le sens longitudinal et transforme ainsi le mouvement de torsion du ressort dynamométrique en un mouvement rectiligne qui actionne l'aiguille du cadran A.

C, Arbre du dynamomètre.

D, Tourniquet à succion, remplacé par l'appareil OLM ou indicateur des vitesses angulaires : cet indicateur des vitesses est une réduction du dynamomètre proprement dit.

E Machine dynamo d'absorption.
F, Léger ressort antagoniste ramenant le manchon mobile B' sur le manchon fixe B, de façon que les deux plans inclinés coïncident dans la position normale au repos.
G, Gorge profonde dans laquelle pénètre la petite manivelle qui entraîne l'aiguille du cadran A
H, H' Colliers à écrous, réunissant l'appareil dynamométrique au moteur K et à la machine dynamo E.
K, Machine moteur à vapeur.
L, Cadran indicateur des vitesses angulaires.
OLM, Appareil indicateur de vitesses, en tout semblable au dynamomètre proprement dit, composé des mêmes organes, mais en réduction M est un volant à palettes légères indéformable.

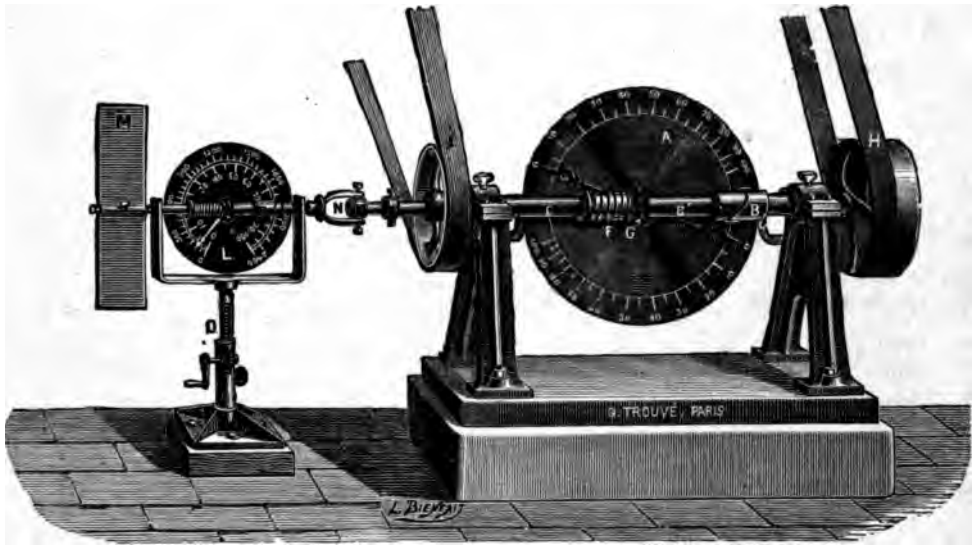


FIG. 5. — DYNAMOMÈTRE DE DISTRIBUTION OU DE TRANSMISSION (MODÈLE DÉFINITIF) DE M. TROUVÉ

A, Cadran indiquant l'effort dynamométrique.
B, B' Manchons fixe et mobile, à plans inclinés, actionnant l'aiguille du cadran A.
C, Arbre du dynamomètre.
F, Léger ressort antagoniste à boudin ramenant le manchon mobile B dans sa position normale au repos.
G, Gorge profonde du manchon mobile B' agissant sur l'arbre coudé de l'aiguille du cadran A.
H, Poulies fixe et folle de commande recevant la courroie du moteur.
I, Poulie de distribution ou de transmission.
L, Cadran indiquant les vitesses angulaires, par un mécanisme en tout semblable, mais en réduction, à celui du dynamomètre d'absorption à palettes (fig. 1).

CONCLUSIONS

En résumé, M. Trouvé estime que son dynamomètre universel est appelé à rendre des services signalés à l'industrie pour les raisons suivantes :

1° Il donne, à tout moment des indications précises et à lecture directe qui sont indépendantes d'erreurs, de calculs et d'appréciations.

Les effets en sont constants et permanents.

Cette permanence des résultats donne, à chaque instant, le moyen de se rendre compte du prix de revient du travail (représenté par le combustible consommé) comparé au travail rendu.

2° Il convient tout aussi bien aux petites forces qu'aux grandes ; il peut s'adapter directement entre la puissance et la résistance, sans qu'on ait à se préoccuper ni du sens du mouvement, ni de la position relative des machines entre elles.

L'emploi du ressort plat évite les frottements, les effets de la force centrifuge, et il permet, sans faire subir de changement à aucun des organes de l'appareil, de pouvoir doubler, tripler..... sa puissance en doublant, triplant..... le nombre des lames suivant la résistance à vaincre, sans augmentation du volume du dynamomètre.

C'est en même temps un frein d'absorption et de distribution donnant, à lecture directe, les valeurs exactes des deux facteurs du travail : $E \times V$ quelles qu'en soient les conditions.

Les résultats, toujours constants dans leur exactitude, et les indications permanentes peuvent être enregistrés par les appareils connus.

La simplicité de ces dynamomètres d'absorption et de distribution est une des garanties de leur bon fonctionnement, et le frottement tout à fait négligeable des organes de mesure, est une des raisons de l'exactitude de leurs indications.

NOTE

SUR UN

COMPTEUR TOTALISATEUR A DEUX ROULETTES

et à mouvement différentiel

PAR

M. N.-J. RAFFARD

Dans les expériences dynamométriques de longue durée, sur la traction des véhicules, des charrues, ainsi que sur des machines-outils, par exemple, l'emploi d'un totalisateur donnant directement les résultats, devient souvent indispensable.

C'est pourquoi l'étude suivante qui a pour objet la construction d'un de ces appareils de mesure n'est peut-être pas sans intérêt.

Vous connaissez tous le totalisateur à plateau et à roulette de Poncelet et du général Morin, représenté ci-contre figure 1. Cet appareil classique a rendu et rend encore de grands services, malheureusement on a souvent constaté que les indications qu'il donnait étaient inférieures au travail réellement dépensé, et que l'écart était d'autant plus grand que pendant l'expérience l'action de la puissance motrice ou celle de la résistance à vaincre avait été plus faible et plus irrégulière. L'erreur provient toujours d'un certain patinage ou glissement de la roulette sur le plateau, et l'écart est d'autant plus grand que la roulette est restée plus longtemps dans le voisinage du centre du plateau, malheureusement rien dans l'appareil ne constatant l'étendue ni même la présence de ces glissements, on est toujours dans le doute sur l'exactitude des résultats qu'il fournit.

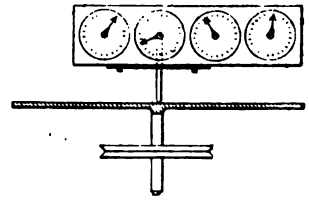


FIG. 1

C'est dans le but de soustraire l'appareil à cet inconvénient, que j'ai imaginé

le dispositif à deux roulettes représenté par la figure 2, dans lequel, deux roulettes situées de part et d'autre de l'axe d'un plateau annulaire sont solidaires d'une même pièce reliée au ressort du dynamomètre.

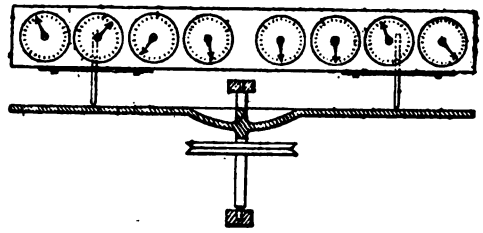


FIG. 2

Cette disposition offre les avantages suivants :

1° Dans leur déplacement par suite des variations de l'effort, les roulettes roulent toujours sur des circonférences dont le diamètre est très grand par rapport au leur, ce qui supprime le glissement ou tout au moins le rend à peu près constant quelle que soit la distance de la roulette à l'axe du plateau. De plus le sens de la rotation des roulettes ne change pas lorsque le travail à enregistrer devient négatif (1).

2° La distance des deux roulettes, dont les diamètres sont parfaitement égaux étant invariable, elles se déplacent toujours également de part et d'autre du cercle médiant de l'anneau : l'une d'elles se rapprochant de l'axe de l'anneau précisément de la même quantité dont l'autre s'en éloigne ; il en résulte donc que quelles que soient les variations de tension du ressort du dynamomètre, et par suite les déplacements des roulettes par rapport à l'axe du plateau annulaire, la somme des nombres de tours des deux roulettes reste constante pour un même nombre de tours de ce plateau. Ce rapport constant entre les nombres de tours du plateau et celui des roulettes servira précisément de contrôle au fonctionnement de l'appareil, car il permettra de constater le glissement des roulettes et d'évaluer la grandeur des corrections à apporter aux résultats indiqués.

Le fonctionnement du totalisateur à deux roulettes se conçoit aisément, car il est tout-à-fait semblable à celui du totalisateur à une seule roulette. Tant que le ressort du dynamomètre est au zéro les deux roulettes tournent en sens contraire, roulant avec une égale vitesse angulaire sur une même circonférence de l'anneau, et chacun des compteurs que ces roulettes actionnent indiquent exactement le même nombre (si l'appareil est bien réglé) : mais quand, par suite d'une résistance à surmonter, ce ressort vient à fléchir, alors les nombres de tours des

1. Quand pendant l'expérience, le travail à enregistrer doit devenir négatif à un certain moment, on emploie alors un ressort de dynamomètre formé de deux ressorts tendus en opposition.

deux roulettes varient également en sens contraire, et la différence de leurs nombres de tours, indiquée par un système différentiel est proportionnelle au travail transmis. S'il n'y a pas eu de glissement, le rapport de la somme des nombre de tours des deux roulettes à celui des nombres de tours du plateau n'aura pas sensiblement varié. L'appareil se sert donc à lui-même de contrôle.

NOUVEAU DISPOSITIF DU TOTALISATEUR A DEUX ROULETTES

Depuis ma récente communication au Congrès de mécanique portant sur un totalisateur à deux roulettes, j'ai pensé qu'il y aurait peut-être avantage à remplacer le plateau annulaire de cet appareil par deux troncs de cône identiques dont les axes se couperaient et dont la vitesse angulaire serait exactement la même. Ces cônes étant disposés de telle manière que chacun d'eux ait une génératrice en coïncidence avec une ligne droite parallèle à l'axe des roulettes, cette droite étant le lieu de contact des roulettes sur les cônes.

Cette solution est susceptible des deux dispositions que nous allons signaler.

Dans la première, représentée (figure 3), les deux cônes A et A' s'en-

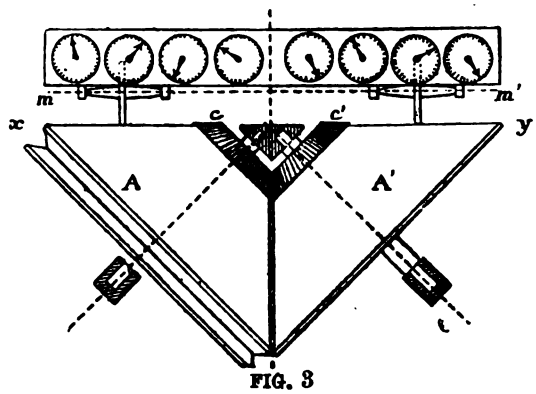


FIG. 3

traînent mutuellement par des couronnes dentées cc' fixées aux deux petites bases de ces cônes, dont les surfaces coïncident avec la droite xy, parallèle à l'axe $m\,m'$ des roulettes du compteur.

L'appareil se conçoit aisément et l'on comprend que cette construction ne

change rien au principe du totalisateur à deux roulettes, car ces cônes développés représenteraient chacun une moitié du plateau annulaire.

La seconde disposition indiquée par la figure 4, est l'inverse de la première : les cônes tronqués A et A' s'entraînent par les grandes bases au moyen des engrenages *c c'*. Rien n'est encore changé, car, comme dans le cas précédent, la somme des révolutions des roulettes reste la même, quelle que soit leur position sur les cônes : ce qui assure le contrôle du fonctionnement de l'appareil ; il va sans dire que la distance qui sépare les deux roulettes reste toujours invariable.

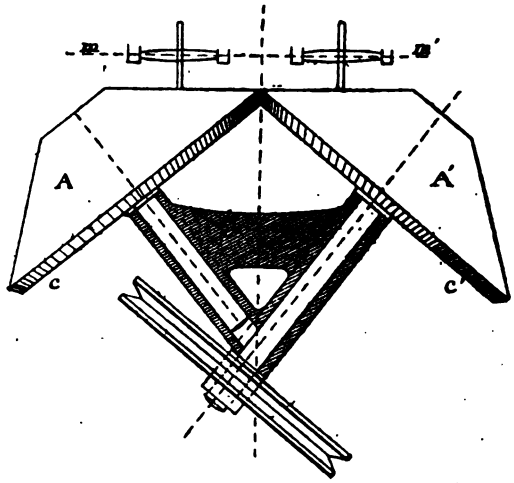


FIG. 4

Ces dispositifs à cônes possèdent l'avantage de pouvoir, pour un même diamètre des roulettes et des circonférences moyennes des cônes, faire varier la différence des nombres de tours des roulettes, correspondant à une flexion donnée du ressort. On conçoit en effet que si l'on donne à ces cônes des formes successives comprises entre un cercle et un cylindre, il faudra une flexion de plus en plus grande, pour une même indication du compteur. On est donc maître dans la construction de ces appareils de modifier les conditions de fonctionnement du compteur.

D'autre part l'emploi des cônes semble devoir améliorer le roulement des roulettes.

Nous avons vu dans notre précédente note, que la roulette glissait vers le centre du plateau, et bien que le roulement fut de meilleur en meilleur à mesure qu'elle s'éloignait davantage du centre, ce roulement n'était jamais géométriquement parfait (1). Il le serait au contraire sur une surface cylindrique dont

1. Pour qu'il le fût, il faudrait que l'axe des roulettes passe toujours par le centre du plateau au lieu de lui être parallèle.

l'axe serait parallèle à celui des roulettes. Or la disposition par cônes dont les axes sont inclinés par rapport à celui des roulettes est intermédiaire entre celle du plateau dont l'axe est perpendiculaire à celui des roulettes et celle du cylindre dont l'axe lui serait parallèle. Il y a donc lieu de croire qu'à égale surface de plateau annulaire et de cône, le roulement des roulettes dans l'appareil à cônes sera encore plus parfait que dans celui à plateau annulaire.

FREINS ÉLASTIQUES POUR MACHINES

PAR

M. SNYERS

Tous les freins pour machines sont, sans exception, basés sur le principe de la friction. Leur rendement utile dépend donc du cœfficient de frottement, soit 18 à 30 % seulement de la pression exercée.

Lorsqu'il s'agit de produire des résistances énergiques, il faut par conséquent avoir recours à un outillage compliqué et coûteux pour multiplier et transmettre cette pression. Au point de vue de la sécurité, il est évident que plus une pièce est soumise à des réactions violentes, plus il y a d'alea en faveur d'une rupture. En outre, les machines en mouvement auxquelles on applique soudain la résistance rigide des freins à friction, sont animées d'une puissance vive qui doit être absorbée d'une façon ou de l'autre, soit par des vibrations moléculaires, soit par des échauffements, soit par des arrachements de matière, se traduisant tout au moins par une usure rapide des surfaces en contact.

On arrive il est vrai à rester dans les conditions voulues de sécurité et de conservation des machines, mais alors aux dépens de leurs conditions économiques, en répartissant ces réactions moléculaires dans une plus grande masse de matière, et en donnant par conséquent aux pièces mécaniques des dimensions beaucoup plus fortes qu'il n'est nécessaire.

Un autre défaut des freins à friction, est l'inconstance de leur rendement. Le cœfficient de frottement dépend en effet de causes multiples et complexes; la manœuvre des freins à friction est donc incertaine et elle exige des manipulateurs habiles qui ne parviennent pas toutefois à soustraire complètement les machines à des chocs fâcheux.

Il y aurait donc intérêt réel à user d'un frein qui ne possèderait pas les défauts signalés plus haut.

Telles sont les conditions du frein dit élastique.

Par la nature même du procédé, les desiderata de la question des freins sont résolus.

En effet :

1° La résistance procède d'un corps élastique et vibrant, qui absorbe par lui-même, tout le travail de la puissance vive des pièces en mouvement.

2° La résistance est due à l'inflexion répétée et multipliée d'une multitude de lamelles, dont le plus grand effort F s'exerce en sens contraire du mouvement qu'il faut neutraliser. La composante normale N, et qui par conséquent constitue l'effort avec lequel le frein doit être appliqué, n'est qu'une fraction du premier.

3° Le frein élastique développe une résistance constante et invariable, à tel point qu'une fois réglé suivant l'usage qu'on veut en faire, il se comporte comme un instrument de précision.

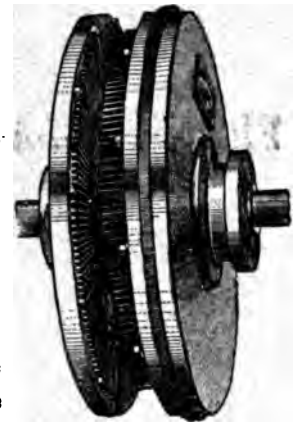


FIG. 1

La sécurité du frein élastique est aussi plus grande.

Au point de vue de la manœuvre d'abord, car les mécanismes intermédiaires n'étant pas soumis à des réactions violentes et brusques, sont d'autant moins sujets à se rompre; ensuite le manipulateur ayant à sa disposition un outil invariable arrivera sans peine à en obtenir des effets précis.

Au point de vue du frein proprement dit, c'est-à-dire du corps élastique et vibrant, la résistance procède d'une multitude de fibres non solidaires entr'elles, et travaillant chacune très en dessous de sa limite d'élasticité. Or il est certain que plus le nombre d'éléments indépendants qui concourent à un même effet est grand, moins il y a de probabilités pour la perte et même l'altération de cet effet.

Le frein élastique est encore entre tous le plus économique, et pour ces motifs; qu'il n'use ni ne détériore les machines en quoi que ce soit, et exige des mécanismes intermédiaires de résistance et de complication beaucoup plus réduites que pour les freins à friction.

Nous terminerons cet exposé des freins élastiques par un exemple d'application aux freins d'une machine d'extraction.

Nous référant aux figures 2 et 3; le frein comprendra un disque à corrugations I, calé sur l'arbre des bobines.

En face est un autre disque B garni des dites lamelles flexibles, et maintenu par un manchon creux M dans un solide bâti Q ancré dans les fondations de la machine. Le manchon M est pourvu de quatre cales C légèrement inclinées en hélice, qui l'empêchent de tourner dans le bâti Q, mais permettent de le mouvoir pour approcher ou écarter le disque B du disque I.

Ce mouvement n'a que 5 à 6 millimètres d'amplitude et il est ordonné par un écrou E vissé sur le manchon M. Le pas de vis est tel, qu'une fraction de $\frac{1}{12}$ ou $\frac{1}{15}$ de tour suffit pour embrayer le disque B avec I ou l'en débrayer.

FREINS ÉLASTIQUES POUR MACHINES PAR M. SNEYERS

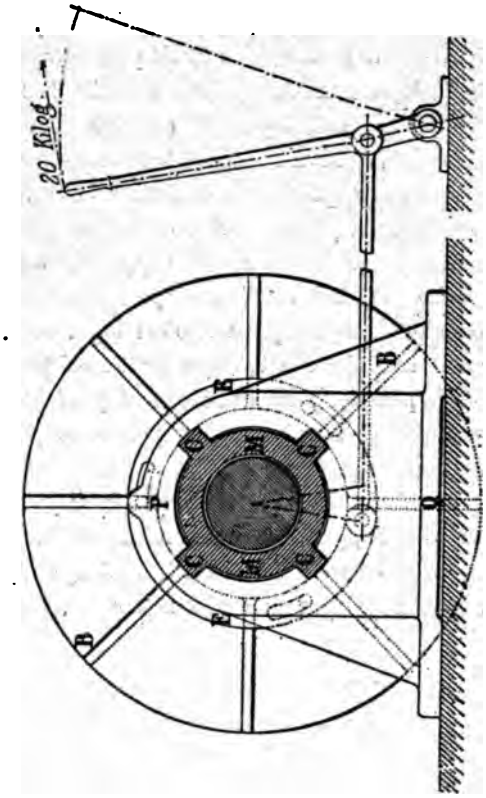


FIG. 3

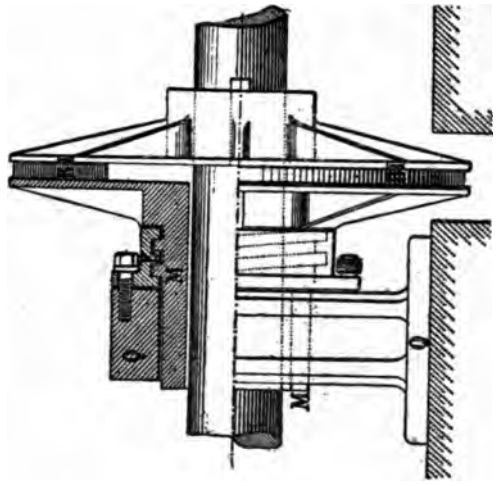


FIG. 2

Il ne faut pas induire de la délicatesse relative des éléments mis en œuvre que les dimensions du frein atteignent des proportions énormes.

Un diamètre d'environ trois mètres suffirait pour transmettre une force de 100 000 (cent mille), kilogrammes sur un bras de levier de $1^m,40$, et telles sont les dimensions d'un appareil projeté pour un laminoir reversible dont la machine, d'une puissance de 75 chevaux, tourne à 65 tours par minute. La puissance de l'appareil étant ici proportionnée non avec le travail que peut développer le moteur, mais avec la puissance vive du volant qui pèse 60 tonnes.

L'effort d'application des deux disques de l'appareil, l'un contre l'autre, ne dépasse 7000 à 8000 kilogrammes, tandis que, pour une même transmission par cônes de friction, cet effort aurait dépassé 40 000 kilogrammes.

On peut obtenir avec les freins élastiques un arrêt aussi prompte qu'il est nécessaire. La durée de la période de ralentissement dépendant exclusivement de l'excédent de la résistance sur la puissance, on pourra toujours calculer la première en conséquence.

Mais au point de vue de la vibration de l'ensemble, il y a une différence essentielle entre les effets de l'application d'une même résistance par l'entremise d'une masse rigide comme les blocs d'un frein à friction, ou par une masse divisée élastique et vibrante, comme les lamelles flexibles du frein élastique.

NOTE

SUR LES

TRANSMISSIONS PAR POULIES ET COURROIES

PAR

M. A. BRANCHER

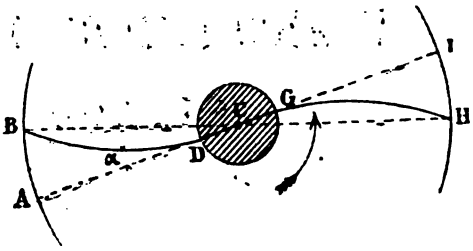
RÉSULTATS DIFFÉRENTS OBTENUS AVEC LES POULIES DE TRANSMISSION SUIVANT LEUR MODE DE CONSTRUCTION ET LEUR INSTALLATION. DISPOSITIONS PRISES POUR AUGMENTER LEUR RENDEMENT.

Depuis quelques années les poulies en tôle de fer ou d'acier ont pris dans les ateliers de mécanique appliquée une grande faveur. — Les constructeurs étrangers ont présenté une variété de types différents assez grande pour embarrasser le choix du mécanicien. — En dehors des qualités inhérentes au choix de leur matériaux qui constituent leur *légèreté* et leur *résistance*. Il faut remarquer la sécurité que peut donner la combinaison rationnelle des trois éléments constitutifs de la poulie en fer. 1° Limbe ou jante, 2° bras, et 3° moyeu.

L'avantage sur les poulies en fonte est facile à établir, car, pour alléger les poulies en fonte, les difficultés rencontrées dans la fonderie sont nombreuses. Il faut établir entre les sections et les masses des différentes parties, les proportions convenables pour éviter les retraits inégaux et, suivant un ingénieur bien compétent en ces matières, les calculs ne prévalent pas contre les incertitudes des tensions provenant des contractions contrariées dans le moule, et le coefficient de sécurité, qu'on se donne au jugé, entraîne à des poids que l'on serait tenté de croire exagérés et même intéressés de la part des fondeurs. Dans ces derniers temps on a sacrifié le coefficient de sécurité pour gagner de la légèreté.

Les accidents survenus aux poulies de grande vitesse ont alors déterminé la faveur des poulies en tôle.

Dans le calcul des poulies en fonte, une des grandes préoccupations réside dans l'évaluation des efforts dûs à la force centrifuge, par suite du poids de la jante (3 et 4 fois supérieur à celui des autres parties de la poulie) et des réactions auxquelles sont soumis les bras. Comme le calcul le prouve, les bras travaillent, dans le cas de jante rigide, plus à la traction qu'à la flexion et la fonte est peu favorable à ce genre de résistance; voici pour les poulies en fer la marche suivie dans l'évaluation des efforts auxquels résistent *les bras* des poulies en fer dont nous nous occupons.



Soit ADGI un bras diamétral devenant par le couple de torsion du moyeu : BDCH.

Les bras, dans le léger déplacement relatif, sont fléchis, et surtendus, puisque la distance AI = BH invariable.

Nous négligerons l'effet d'obliquité de DCG sur BCH, car il tend encore à donner la prédominance à la tension des bras sur la flexion.

1re Flexion. Soit l la longueur du bras en millimètres,

a son demi diamètre en millimètres.

S sa charge égale 15 kilogrammes à la limite d'élasticité par millimètre carré,

I moment d'inertie en millimètres carrés,

P charge en kilogrammes à la jante pour 1 bras.

E = 20 000 module d'élasticité par millimètre carré,

f flèche.

$AB = f = \frac{P\,l^3}{3IE}$ $\quad P = \frac{15\,I}{l\,a}$ d'où en remplaçant P par sa valeur $f = \frac{5\,l^3}{20000\,a}$

ou

$$\frac{a\,f}{l} = \frac{5\,l}{20000}$$

En prenant l pour unité, a sera exprimé en fraction de l.

on aura

$$af = \frac{5}{20000} = \frac{1}{4000} = 0{,}00025$$

$$f = \frac{1}{4000\,a}$$

Allongement des bras, (en négligeant l'influence du moyeu qui tend encore à faire prédominer l'action en traction des bras.)

Considérons ADB comme triangle rectangle en A avec angle BDA $= \alpha$. (l toujours pris pour unité.) Approximativement BA $= \sin \alpha$
et

$$\frac{\text{AD Bras unité}}{\text{BD Bras allongé}} = \cos \alpha$$

le bras à la limite d'élasticité devient 1,007 (UHLAND).

$$\cos \alpha = \frac{1}{1{,}0007} = 0{,}99993.....$$

$$f' = \sin \alpha = \sqrt{1 - (0{,}99993)^2} = \sqrt{0{,}0000289049}$$

pour la traction

$$f' = \sin \alpha = 0{,}005360 \quad \text{à la limite d'élasticité}$$

on avait par flexion à limite d'élasticité

$$f = \frac{5}{20000\, a}$$

donc même si $a = 0{,}05$ de l on aura seulement

$$f = \frac{5}{20000 \times 0{,}05} = \frac{5}{1000} = 0{,}005$$

et pour les valeurs de a inférieures à 0,05 de l, *on aura* f plus grand, ainsi pour $a = 0{,}04$ $f = 0{,}0062$, *donc la rupture par allongement précèdera de beaucoup celle par flexion, car le déplacement* f' *occasionnant rupture par allongement est plus petit que celui occasionnant rupture par flexion.*

Mais à une jante rigide nous opposons l'hypothèse *vraie* d'une jante faiblement flexible en tôle d'acier, pour rentrer dans la thèse de la double flexion des bras, nous calculons nos bras comme devant résister aux efforts qui sollicitent la jante et les bras aux points d'entrée et d'échappement de la courroie.

Cette méthode donne des résultats consacrés par la pratique, on arrive ainsi à avoir des bras en fer de bonne qualité, solidarisés par le moyeu par encastrement et articulés au limbe dont le fonctionnement est très satisfaisant.

En outre, nous justifions la préférence des mécaniciens pour la *poulie à jante de tôle d'acier ou de fer*, par *l'accroissement de rendement dû au coefficient de frottement.* En effet, dans les poulies en fonte, en pratique, on admet très généralement un coefficient $f = 0{,}30$; pour les poulies en fer avec jante ou limbe perforé $f = 0{,}50$.

Les formules fondamentales qui règlent les tensions des brins de la courroie sont suffisamment connues.

Soit l'effort tangentiel qui correspond à *l'effet utile* de la poulie désignée par Q, les tensions par T et t du brin conducteur et du brin conduit, f le coefficient

de frottement, θ l'angle embrassé par la courroie, e base des logarithmes népériens=2,718.

On a :

$$Q = T - t = T(1 - e^{f\theta})$$

ou

$$Q = T\left(e^{f\theta} - 1\right) = T\left(e^{fn\pi} - 1\right) \qquad (1)$$

et la tension initiale pour deux poulies sera :

$$T = \frac{T \times T_2}{2\,Q} = \frac{\left(e^{fn\pi} + 1\right)}{2\left(e^{f\theta} - 1\right)}.$$

De ces formules, on conclut que le rendement des poulies dépend essentiellement de la valeur du coefficient de frottement et de l'arc embrassé qui entrent dans la formule comme coefficients exponentiels positifs.

D'après Unwin, Leloutre, Wils, Ulhand, les coefficients pratiques d'une courroie sur un limbe en fonte seraient :

$f = 0{,}155$ pour un limbe en fonte lisse.

$f = 0{,}286$ pour un limbe en tôle de fer poli par l'usure.

$f = 0{,}376$ pour un limbe en tôle d'acier.

$f = 0{,}482$ pour un limbe en tôle perforée (1).

Ce coefficient varie avec la vitesse, la nature des contacts et la pression. Cette dernière cause doit être le plus près possible de sa limite inférieure.

Pour une courroie ordinaire on admet *un effort de 20 kilogrammes* comme limite normale de tension.

Jantes en fonte.

$$T = 20 \text{ kilog.} \qquad t = 0{,}6\ T = 12 \text{ kg.}$$

$$Q = 8 \text{ kg.}$$

$$L = \frac{T - t}{T_1 - T_2} = \frac{Q}{8} = \frac{180 \text{ chev.}}{\text{Diam.} \times \text{et nomb. de tours}}$$

Limbes en fer.

$$T = 20 \text{ kilog.} \qquad t = 0{,}4\ T = 8 \text{ kilog.}$$

$$Q = 12 \text{ k.}$$

$$l = \frac{125}{DN}$$

(1) Les coefficients de frottement des courroies sur limbe sont très variables suivant les cas d'application. Nous avons indiqué les chiffres les plus bas.

Avec

$$f = 0{,}30 \quad \text{on a} \quad \frac{12-8}{8} = \frac{1}{2} \text{ soit } 50\ \% \text{ en plus.}$$

$$f = 0{,}20 \quad \frac{9.48-8}{8} = \frac{1.48}{8} \text{ soit } 18.5\ \%$$

Si à ce premier bénéfice on ajoute celui obtenu par l'accroissement de l'arc embrassé on reconnaît *l'économie* résultant de ces dispositions. Dans les transmissions de mouvement par poulie et courroie, on gagne, avec de bonnes dispositions, 25 et 30 % de force inutilement absorbée par les frottements exagérés dûs à des installations défectueuses. C'est ce que je tenais à démontrer le plus brièvement possible.

Les considérations sur la formule de l'enroulement des courroies ou cordes nous ont conduit au self-embrayage représenté ci-dessous.

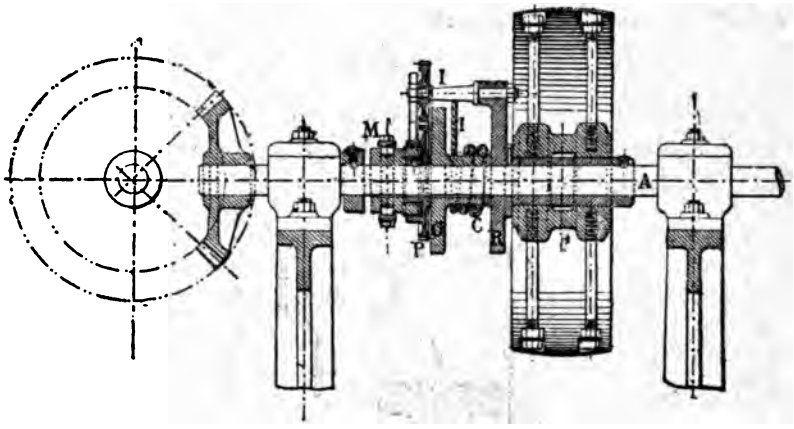


FIG. 1

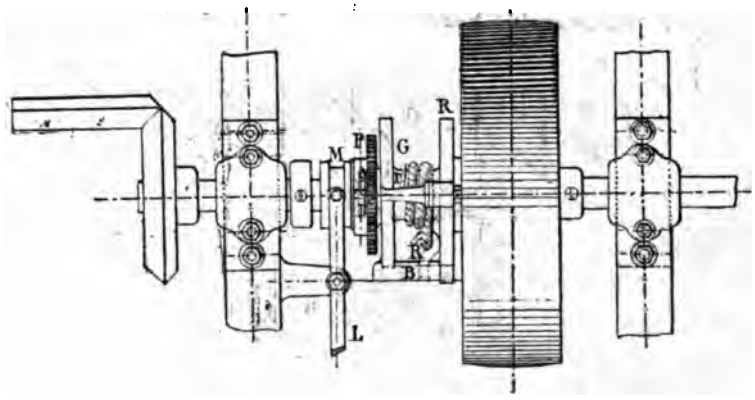


FIG. 2

Le principe de l'appareil repose sur l'accroissement rapide de l'effort obtenu par l'enroulement d'une corde ou lien flexible autour d'un cylindre G.

La formule

$$R = Te^{fn\pi} = T \times 2.718^{0.4n\pi}$$

donne la valeur de la résistance, qui au troisième tour est plus de 500 fois supérieure à l'action T.

Les figures 1 et 2 donnent, en coupe verticale et en plan, une première disposition de ce self-embrayage funiculaire à enclanchement direct, dans lequel :

R est le plateau à entraîner;
G un manchon calé sur l'arbre A et sur lequel s'enroule la corde C;
I petit axe parallèle au premier auquel est attachée l'extrémité de cette corde.
M manchon glissière portant cône de friction ou gril;
L levier actionnant le manchon M;
P plateau à engrenage actionnant le pignon de l'axe I.

Après avoir établi un appareil marchant avec une corde, nous avons adopté le collier à lames parallèles et successives dont le travail est analogue à celui d'une corde enroulée en hélice.

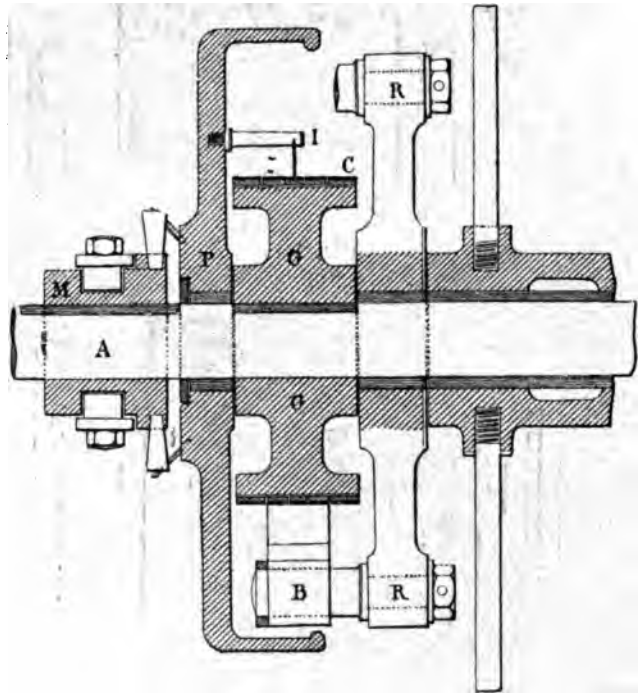


FIG. 3

Ce dispositif a permis de simplifier l'appareil qui est représenté figures 3 et 4.

Le collier formé de 3 ou 5 spires a un diamètre légèrement supérieur à celui du galet G dans sa position libre; mais dès que le moindre effort, exercé en I, ferme le premier cercle, le mouvement se propage dans les cercles successifs, en s'accentuant jusqu'à l'extrémité, et l'effort ainsi accrû est utilisé pour entraîner le plateau R.

Aussitôt que l'effort, si minime qu'il soit, exercé en I, cesse, le collier se détend, le plateau R redevient indépendant, ainsi que la poulie et l'outil conduit par cette transmission. Quant à l'action sur le brin libre I, on l'obtient au moyen d'un cône de friction ou d'un gril avec lames que l'on manœuvre à l'aide d'un levier actionné directement ou au moyen d'une vis.

Dans ces figures:

A représente l'arbre moteur;

G le galet d'entraînement calé sur l'arbre;

M un manchon glissière à cône ou à peigne;

R.R' plateau à entraîner;

P plateau d'enclanchement;

C collier à lames d'acier et cuir;

B maneton reliant RR' à C;

I extrémité de la première lame fixée à P.

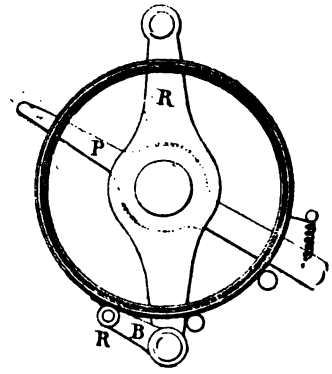


FIG. 4

La figure 4 est une coupe de l'appareil montrant le collier serré sur le galet.

A l'Exposition de 1889, un appareil de ce genre servait à embrayer une dynamo qui faisait 1400 tours par minute.

Ce système paraît présenter toute la sécurité désirable pour embrayer en marche, sur les moteurs à grande vitesse, les récepteurs les plus résistants.

FONDATIONS ELASTIQUES ET ISOLANTES

en vue d'amortir les chocs et les vibrations

PAR

G. ANTHONI

Les moyens employés jusqu'à ce jour pour amortir les chocs et les vibrations et les empêcher de se transmettre au loin ont rarement donné de bons résultats.

On a employé les fondations rigides ou les corps élastiques.

Les fondations rigides, formées de massifs de maçonnerie, même avec superposition de charpentes et entourées de tranchées sont restées insuffisantes ; il est facile de comprendre qu'il n'y avait pas isolement complet, les vibrations se transmettant par la base.

On a employé des fondations avec caoutchouc interposé sous les pièces à isoler. Ce procédé a donné de bons résultats dans certains cas, mais aussi beaucoup d'insuccès dont il est utile de rechercher les causes.

Le meilleur moyen d'isoler deux pièces est d'interposer du caoutchouc, qui offre toute garantie, si on a soin d'éviter les deux montages défectueux dont je vais signaler les inconvénients.

1° La pièce à isoler est simplement *posée* sur des blocs de caoutchouc.

Ce mode d'emploi du caoutchouc, usité de tout temps, donne de très bons résultats parce que l'isolement est complet, mais on peut rarement l'utiliser ainsi. En effet, dans les machines à vapeur, ce montage serait instable et le service difficile ; dans les essoreuses, les ventilateurs, l'instabilité deviendrait même dangereuse ; dans les marteaux pilons, ce montage diminuerait l'effet utile, le poids de la chabotte se trouvant diminué, par suite de l'interposition des blocs de caoutchouc sous la semelle du bâti, de toute la masse du sol environnant, qui augmentait auparavant l'effet utile, mais en recevant et en transmettant, il est vrai, les vibrations dont le caoutchouc empêche la transmission.

2° La pièce à isoler est posée sur des blocs de caoutchouc et *fixée par des boulons* pour lui donner de la stabilité.

Les vibrations passent alors par les boulons et l'isolement que l'on cherchait à obtenir, par l'emploi du caoutchouc, ne peut se produire ; le caoutchouc est

donc employé en pure perte : en effet, si on serre fortement le boulon pour donner de la stabilité, le caoutchouc se comprime et perd son élasticité ; si au contraire on ne serre pas le boulon, il est alors aussi employé en pure perte, puisqu'on n'obtient pas plus de stabilité que lorsque la pièce est simplement posée sur les blocs de caoutchouc et que souvent le boulon se casse par les contrecoups.

Ce montage défectueux est appliqué à un grand nombre de wagons de chemins de fer et ne peut produire aucun résultat.

Les insuccès peuvent aussi venir du mauvais emploi du caoutchouc, car, pour réussir un isolement, il y a lieu d'étudier les conditions que doivent remplir les blocs au point de vue de leur qualité, de leur forme, de leur surface et de leur épaisseur ; employé dans les conditions ci-dessus, le caoutchouc donne toute sécurité de souplesse et de durée ; des blocs de caoutchouc, retirés au bout de dix ans du dessous d'un marteau pilon ayant constamment fonctionné, se sont trouvés en parfait état de conservation.

Les *fondations* et les *attaches élastiques* et *isolantes* de M. G. Anthoni évitent les inconvénients signalés plus haut.

Pour isoler les machines sur ses fondations élastiques, M. G. Anthoni construit sur le bon sol un plancher métallique destiné à répartir uniformément la pression. Des blocs de caoutchouc, placés sur ce plancher, supportent un second plancher formé d'une tôle et de fers profilés sur lesquels on fixe les machines à isoler.

Pour donner de la stabilité, M. G. Anthoni emploie deux procédés.

Le premier consiste à augmenter la masse en bâtissant un *massif*, d'un poids convenable, entre le plancher supérieur et la machine à isoler ; ce moyen est applicable aux marteaux pilons notamment, pour ne pas diminuer leur effet utile.

Le second moyen de donner de la stabilité consiste à fixer par des *attaches élastiques* garnies de caoutchouc, le plancher supérieur, qui porte directement les machines, au plancher inférieur qui supporte le poids total, par l'intermédiaire des caoutchoucs, et le répartit uniformément sur le sol.

M. G. Anthoni met à la disposition des membres du Congrès sa brochure sur l'*isolement* et donne quelques détails sur ses différents procédés qui sont applicables aux voitures, wagons, transmissions, essoreuses, ventilateurs, machines à imprimer, à planer, marteaux pilons, machines à vapeur et dynamos, etc. L'application de l'isolement aux voitures, par le tasseau élastique placé entre l'essieu et le ressort, augmente leur durée en augmentant la douceur de la suspension.

L'isolement complet obtenu par les fondations élastiques a son importance spéciale au point de vue de l'isolement des machines électriques, qui sont ainsi complètement isolées du sol.

TABLE DES MATIÈRES

Contenues dans le Quatrième volume

DES

TRAVAUX DU CONGRÈS INTERNATIONAL DE MÉCANIQUE APPLIQUÉE

Pages.

TROISIÈME QUESTION. — Les machines frigorifiques et leurs applications à l'Exposition universelle de 1889, par M. Richard 1

Machines à air 2

Principaux types de machines à air 17
Machines de Windhausen 17
Machines Giffard 21
Machines Bell et Coleman 26
Machines de Hall 31
Machines Lightfoot 39
Machines de Hargreaves et Inglis 43
Machines de Haslam 46
Machines de M. Mathews 50

Machines à gaz liquéfiés par compression 55
Principaux organes de ces machines 69

Principaux types de machines à gaz liquéfiés 80
Machines Pictet 80
Machines de M. Vincent 87

Machines à ammoniac 89
Machines Linde 89
Machines de Kilbourn 92
Machines de Lavergne 94
Machines Wood et Richmond 101
Machines Puplett 101
Machines Fixary 102

Machines à acide carbonique 116
Machines de Raydt 116
Machines de Windhausen 118

Machines à absorption ou à affinité 124
Principaux organes des machines à affinité 126
Principales machines à affinité. 128
Appareils Carré, Mignon et Rouart 129
Machines de MM. Imbert frères 133
Machines de MM. Pontifex et Wood 133
Machines de Perkins 139
Applications des machines frigorifiques. 141
Fabrication de la glace 142
Fabrication de l'air froid. 154
Conservation des viandes 161
Résumé et conclusions 190

Observations sur la communication de M. G. Richard . . . . . .
Observations de M. Diesel. 193
Observations de M. Hirsch 206
Réponse de M. Richard. 206

Note sur une disposition de machine à glace par M. B. Lebrun . . . 213

QUATRIÈME QUESTION. — Transmission à distance et distribution du travail par les procédés autres que l'électricité (eau, air, vapeur, câbles, etc.). — Rapport de M. Boudenoot. 219
Gaz. 222
Electricité 222
Vapeur 223
Eau surchauffée. 225
Eau sous pression. 227
Air. 229
Câbles télédynamiques 231
Conclusions 233

Note sur la distribution de force motrice à Genève, par M. Butticaz. . 235
Service des eaux de la ville de Genève en 1872 235
Réservoir du bois de la Batie, 1873 236
Machines à vapeur, 1879-1880 236
Installations nouvelles, 1883-1889. 236
Tarifs. 241
Tableau indiquant le développement de la force motrice comparativement à l'ensemble de la vente du service des eaux et forces motrices du Rhône 243
Industries utilisant les forces motrices du Rhône. 244
Résultat financier en 1888. 245
Légende des planches 245

Transmission de la force par les fluides sous pression et son application spéciale au pompage des eaux d'égouts par M. W. Donaldson. — Introduction. 247
Chapitre premier. — Comparaison des prix de production de l'air et de l'eau comprimés 249

Chapitre II. — Comparaison entre l'air et l'eau comme agents de transmission et d'emmagasinage de la force 262
Chapitre III. — Application spéciale de l'eau à haute pression et de l'air comprimé au pompage des eaux d'égouts 266

Transmission du travail à distance par l'air comprimé et l'air rarifié, par M. G. Hanarte 277
Condition principale que doit remplir un compresseur d'air 278
Essais comparatifs faits sur des compresseurs possédant des moyens de refroidissement plus ou moins parfaits. 281
Du compresseur à piston hydraulique à colonnes paraboliques . . . 283
Des conduites de l'air comprimé et de l'air raréfié. Calcul de la perte de charge. Coudes de changement de direction à vitesse ralentie . 288
Utilisation de l'air comprimé. Machines réceptrices à détente compound, à soupapes régulatrices 290

Note sur un système de pompe à tuyères convergentes et divergentes, dite pompe à épanouissement parabolique, par M. G. Hanarte. . 293

Note sur le transport de l'énergie par l'air comprimé, par M. Solignac . 305

Sixième question. — Machines thermiques autres que les machines à vapeur d'eau.
Rapport de M. J. Hirsch.
Exposé et division 315
Comparaison avec la machine à vapeur 315
Décompte de la chaleur consommée par une machine à vapeur . . . 317
Décompte de la chaleur dans les moteurs thermiques en général. . . 321
Du rendement thermique comme base de comparaison 321
Considérations diverses 322
Classification des moteurs thermiques 323
Machines à vapeur d'eau surchauffée. 324
Vapeurs diverses 325
Machines à air chaud. 326
Des régénérateurs de chaleur 327
Chauffage extérieur 328
Chauffage intérieur 328
Combustibles solides 329
Combustibles gazeux 329
Combustibles liquides. 330
Combustion ou explosion 331
Combustion continue. 332
Explosion 332
Pertes par les parois 333
Imperfection du cycle. 334
Résistances passives 335
Allumage et combustion imparfaite 335
Effet utile des machines à explosion 335
Procédés d'allumage 336
Eau consommée. 337
Organes régulateurs de la vitesse 337

Compression préalable 338
Machines mixtes et diverses 340
Questions diverses 340

De l'emploi des divers moteurs thermiques.
Installations fixes 341
Installations mobiles 341
Questions à examiner par le Congrès 342

Note sur un frein dynamométrique universel à lecture directe de travail, par M. Trouvé 343
1re partie. — Mesure des efforts 344
2e partie. — Mesure des vitesses 348
Emploi du dynamomètre universel 349
Frein d'absorption dynamométrique 349
Frein de distribution dynamométrique 344
Conclusions 355

Note sur un compteur totalisateur à deux roulettes et à mouvement différentiel, par M. N.-J. Raffard 357

Freins élastiques pour machines par M. Snyers 354

Note sur les transmissions par poulies et courroies. -- Résultats différents obtenus avec les poulies de transmission suivant leur mode de construction et leur installation ; dispositions prises pour augmenter leur rendement, par M. A. Brancher 367

Fondations élastiques et isolantes de M. G. Anthoni, en vue d'amortir les chocs et les vibrations 375

TABLE GÉNÉRALE DES MATIÈRES

Contenues dans les quatre volumes

des Travaux du Congrès international de Mécanique appliquée

	Pages	Volumes
Comité d'organisation	1	I
— de patronage	2	I
Bureau du Congrès	6	I
Composition des bureaux des sections	7	I
Liste des membres	7	I
Liste des délégués des Gouvernements étrangers	23	I
Réglement	25	I
Allocution de M. le Président du Comité d'organisation	27	I
Comptes-rendus des séances générales :		
I. — Séance du 16 septembre (matin)	33	I
II. — — 16 — (soir)	34	I
III. — — 17 —	59	I
IV. — — 18 —	80	I
V. — — 19 —	89	I
VI. — — 20 —	112	I
VII. — — 21 —	116	I
Vœux formulés par le Congrès	143	I
Rapports :		
PREMIÈRE QUESTION. — Unification du cheval-vapeur. — Spécification de la puissance des générateurs à vapeur. — Rendement. — Rapport de M. Alfred Tresca	1	II
DEUXIÈME QUESTION. — Etude sur les essais des fers et des aciers. — Rapport de M. E. Cornut	133	III
TROISIÈME QUESTION. — Les machines frigorifiques et leurs applications. — Rapport de M. Richard	1	IV
QUATRIÈME QUESTION. — Transmission à distance et distribution du travail par les procédés autres que l'électricité. — Rapport de M. Boudenoot	219	IV

CINQUIÈME QUESTION. — Machines à vapeur à détente en cylindres successifs. — Rapport de M. A. Mallet . . . . 7 II

SIXIÈME QUESTION. — Machines thermiques à vapeur d'eau. — Rapport de M. J. Hirsch . . . . . 315 IV

Conférences :

Progrès réalisés dans les machines à vapeur depuis 1878. — Conférence de M. Polonceau . . . . . 21 II

Progrès réalisés par les Associations des propriétaires d'appareils à vapeur. — Conférence de M. Bour . . . . . 19 III

Les chaudières à petits éléments à l'Exposition Universelle de 1889. — Conférence de M. Olry . . . . . 45 III

Travaux des sections :

PREMIÈRE SECTION. — Procès-verbaux des séances des 16, 17, 18, 19 et 20 septembre . . . . . 145 I

Pièce annexée au procès-verbal de la séance du 16 septembre 1889. . . . . 155 I

Note sur divers moyens d'économiser la vapeur dans les machines à un cylindre, par M. Dwelshauvers-Dery . . . 171 II

Sur la détermination exacte des positions réciproques de l'extrémité de la bielle et de la manivelle et sur un diagramme de distribution tenant rigoureusement compte de l'obliquité des bielles, par M. F. Dubost . . . . . 185 II

Sur un nouveau procédé de commande des tiroirs de distribution au moyen de l'orientation facultative du collier d'excentrique, par M. Bonjour . . . . . 193 II

La détente Meyer dans les locomotives, par Ad. Meyer . . . 199 II

Communication sur un nouveau type de machine à vapeur accouplée dit « type compound français » par M. A. de Landsée. . . . . 205 II

Essais sur une application spéciale de compound aux machines locomotives existantes, par G.-A.-A. Middelberg, traduction de M. A. de Landsée. . . . . 219 II

Note sur l'aréo-condenseur, par M. F. Fouché. . . . . 229 II

L'arbre, la manivelle. la bielle et le volant, régularisation du mouvement dans les appareils à simple effet. Communication faite par M. N.-J. Raffard . . . . . 235 II

Le frein dynamométrique de M. N.-J. Raffard. Communication de M. Arnoux . . . . . 245 II

Note sur un indicateur de vitesse ou cinémomètre et sur les indicateurs de travail et de puissance, par MM. Richard frères. 259 II

DEUXIEME SECTION. — Procès-verbaux des séances des 16, 17, 18, 19 et 20 septembre . . . . . 156 I

Pièce annexée au procès-verbal de la séance du 18 septembre 1889. 166 I

Note sur une méthode n'exigeant pas la mesure de petites dimensions pour la détermination du coefficient d'élasticité et de la limite des allongements permanents des corps métalliques, par M. Ed. Phillips. . . . . 1 III

De l'emploi des modèles pour déterminer expérimentalement les conditions de résistance des solides élastiques, par M. Ed. Phillips. . . . . 5 III

Note sur le frottement des cuirs emboutis et la mesure exacte des hautes pressions. — Machines d'essai des matériaux sans bascule, par M. Georges Marié . . . . . 9 III

Aperçu d'une étude sur le rendement des chaudières à vapeur par M. A. Huet . . . . . 73 III

Notice historique sur l'épreuve des chaudières à vapeur, par M. A. Huet . . . . . 77 III

Chaudière de locomotive Webb à foyer ondulé rectangulaire. . 85 III

Chaudière de locomotive Webb à foyer d'acier ondulé cylindrique . . . . . 86 III

Chaudière à vapeur, système Rocour. . . . . 89 III

Chaudière multitubulaire à circulation, système de Dion, Bouton et Trépardoux. . . . . 95 III

Note sur l'utilisation des mauvais combustibles, foyers à combustion méthodique, chargement mécanique du combustible, par M. G. Alexis Godillot. . . . . 101 III

Générateur à production de vapeur instantanée (système Serpollet), par M. G. Lesourd. . . . . 115 III

Chaudière à circulation d'eau, système A. Lagrafel et J. d'Allest . . . . . 121 III

Note sur l'emploi de l'eau de mer comme supplément dans les chaudières marines alimentant des machines à triple expansion. par M. D. Stapfer . . . . . 127 III

Sur l'unification des méthodes d'essais des matériaux de construction, par M. Svilokossitch . . . . . 277 III

TROISIÈME SECTION. — Procès-verbaux des séances des 16, 17, 19 et 20 septembre . . . . . 169 I

Observations relatives au rapport de M. G. Richard sur les machines frigorifiques et leurs applications . . . . . .

Observations de M. Diesel . . . . . 193 IV

Observations de M. Hirsch. . . . . 206 IV

Réponse de M. Richard . . . . . 206 IV

Note sur une disposition de machine à glace par M. B. Lebrun. 213 IV

Note sur la distribution de force motrice à Genève, par M. Butticaz . . . . . 235 IV

Transmission de la force par les fluides sous pression et son application spéciale au pompage des eaux d'égouts par M. W. Donaldson. . . . . 247 IV

Transmission du travail à distance par l'air comprimé et l'air raréfié, par M. G. Hanarte . . . . . 277 IV

Note sur un système de pompe à tuyères convergentes et divergentes, dite pompe à épanouissement parabolique, par M. G. Hanarte . . . . . 293 IV

Note sur le transport de l'énergie par l'air comprimé, par M. Solignac . . . . . 305 IV

Note sur un frein dynamométrique universel à lecture directe de travail, par M. Trouvé . . . . . 343 IV

Note sur un compteur totalisateur à deux roulettes et à mouvement différentiel, par M. N.-J. Raffard . . . . . 357 IV

Freins élastiques pour machines, par M. Snyers . . . . . 364 IV

Note sur les transmissions par poulies et courroies, par M. A. Brancher . . . . . 367 IV

Fondations élastiques et isolantes de M. G. Anthoni. . . . 375 IV

ERRATUM

IIe volume, page 50. — La rédaction peu explicite de la note publiée par la Société anonyme des Ateliers de Construction de la Meuse, sur les machines exposées par elle, nous a induits en erreur au sujet de la machine dont nous parlons :

La puissance de cette machine est, en effet, de 25 chevaux, et non de 80, comme cette note semblait l'indiquer; par suite, l'appréciation que nous faisions sur la faiblesse apparente des organes de ce moteur, se trouve, cette rectification faite, dénuée de fondement.

PARIS. — IMPRIMERIE E. BERNARD ET Cie, 71, RUE LA CONDAMINE.

Stanford University Libraries
3 6105 010 766 207

TA 349
C66
1889
V.4

DATE DUE

TIMOSHENKO COLLECTION
IN HOUSE USE ONLY

STANFORD UNIVERSITY LIBRARIES
STANFORD, CALIFORNIA 94305-6004